



Fachhochschule Köln  
Cologne University of Applied Sciences

Gummersbach Environmental  
Computing Center



2012

## Abschlussbericht KANNST

Integrierte Optimierung von Kanalisationssystemen und Kläranlagen  
mit Computational Intelligence Tools



# Autorenliste

Aggerverband:

Martin Graner

Hanstheo Maria Nümm

Martin Staubach

FH Köln:

---

Dr. Tanja Haag

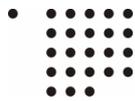
Daniela Brahmi

Cornelia Hoen

Peter Kern

Oliver Trauer

Prof. Dr. M. Bongards



# Vorwort

Der Beginn der industriellen Neuzeit wird gewöhnlich mit der Erfindung der Dampfmaschine durch James Watt gleich gesetzt. Erstmals ermöglichte diese Maschine die Bereitstellung von Energie unabhängig von Jahreszeit und Wind. Damit wurde Ende des 18ten Jahrhunderts zunächst in Großbritannien ein Technologieschub eingeleitet, der vergleichbar ist mit der seit dem 10ten Jahrhundert in Zentraleuropa eingeführten Wasser- und Windmühlen<sup>1</sup>. Legten die älteren Techniken den Grundstein für die Blüte des Hochmittelalters, so begann mit der Dampfmaschinentechnik ein beispielloser technischer Fortschritt, dessen Ende auch heute noch nicht abzusehen ist.

Die Industrialisierung führte zu stark wachsenden Städten, die durch die prekären sanitären Verhältnisse häufig unter Choleraepidemien litten. Erst der Bau leistungsfähiger Kanalsysteme (London ab 1842, Paris ab 1850, Hamburg 1856) konnte diese Krankheiten eindämmen.

Industrialisierung, Wachstum von Städten und der Bau leistungsfähiger Kanalisationssysteme hängen eng miteinander zusammen. Die Dampfmaschine als zentrale Kraftquelle einer Fabrik nimmt hierbei eine Schlüsselrolle ein. Im 19ten Jahrhundert nutzte speziell die Textilindustrie immer komplexere Maschinen die bereits damals einen recht hohen Automatisierungsgrad besaßen. So wurde der 1805 erfundene Jacquard-Webstuhl bereits mit Lochkarten, also mit digitalen Datenträgern gesteuert<sup>2</sup>; er konnte mit diesen Datenspeichern automatisch gemusterte Gewebe erzeugen.

Komplexe Maschinen stellen auch hohe Anforderungen an ihre Antriebe: Neben der jederzeitigen Verfügbarkeit sind Steuer- und Regelbarkeit entscheidende Eigenschaften. Die Drehzahl muss steuerbar sein, also von außen einstellbar – keine hohe Anforderung. Die Regelbarkeit ist komplizierter zu realisieren: Hier darf sich eine einmal eingestellte Drehzahl nicht verändern, auch wenn die Leistungsanforderungen der angetriebenen Maschinen variieren. Klassische Wind- und Wassermühlen waren nicht geregelt, wurden mehr Maschinen angeschlossen, so drehte der Antrieb langsamer und im Leerlauf wurden die Antriebe sehr schnell – der Anschluss einer Maschine erforderte unter Umständen erst ein mühsames Abbremsen, um Verletzungen oder Schäden zu vermeiden.

Die Dampfmaschinen brachte auch hier eine entscheidende technische Verbesserung: 1788 führte Watt erstmalig den Fliehkraftregler in den Maschinenbau ein<sup>3</sup>. Er hielt die Drehzahl einer Maschine dadurch konstant, dass er die Dampfzufuhr entsprechend der anliegenden Belastung automatisch regelte. Die Bedeutung dieser Erfindung ist nicht zu unterschätzen, denn erst die Bereitstellung einer Antriebsleistung mit konstanter Drehzahl eröffnete den Weg zu komplexeren Maschinen und bereitete den Weg zur modernen industriellen Produktion.

Vielfach wird der Beginn der Industrialisierung mit der Einführung der Dampfmaschine als Kraftquelle gleich gesetzt. Es sei den Historikern verziehen, dass sie die entscheidende Bedeutung der selbsttätigen Regelung nicht immer erkannt haben. Eine unregelmäßige Antriebsmaschine ist aber technisch nur bedingt verwendbar und wäre darüber hinaus ein sehr unfallträchtiges Gerät.

<sup>1</sup> I. Morris; Wer regiert die Welt; S. 475 ff; S. 360 ff; Frankfurt (2010)

<sup>2</sup> <http://de.wikipedia.org/wiki/Jacquardwebstuhl> (abgerufen: 22.08.2011)

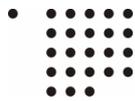
<sup>3</sup> <http://de.wikipedia.org/wiki/Fliehkraftregler> (abgerufen: 22.08.2011)

Das Forschungsprojekt KANNST entwickelt und erprobt neue Techniken und Verfahren zur selbsttätigen Regelung von Kanalnetzen. Damit ergeben sich für die hydraulischen Komponenten des Kanalsystems neue Einsatzmöglichkeiten: So können die Regenrückhaltebecken eines Kanalsystems gezielt aufgestaut oder entlastet werden, um die Belastung der Kläranlage zu vergleichmäßigen oder um eine möglichst geringe Schmutzfracht in die aufnehmenden Gewässer zu entlasten.

Natürlich ist diese Funktion auch mit unregulierten Kanalsystemen verfügbar, aber erst die Regelung ermöglicht die erheblich effizientere Nutzung dieser Komponenten, da das Kanalnetz nun als Gesamtsystem optimal betrieben wird.

Die Kanalnetzregelung wird heute – verglichen mit der Dampfmaschine - mit über 200 Jahren Verspätung realisiert. Aber dies ist gut verständlich, wenn wir die Komplexität der Aufgabe betrachten: James Watt musste eine mechanische Größe, die Drehzahl, regeln. Wir optimieren ein komplexes hydraulisches System mit dutzenden Mess- und Stellgrößen, in dem vielfältige biochemische Prozesse im Zusammenwirken mit dem aufnehmenden Gewässer ablaufen.

Die Projektbeteiligten wünschen sich, dass die im Projekt KANNST entwickelten und erprobten Regelsysteme zu einem ähnlichen technologischen Schub in der Abwassertechnik führen, wie es die drehzahlregelte Wattsche Dampfmaschine für die industrielle Fertigung bewirkt hat.

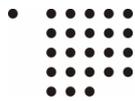


# Inhaltsangabe

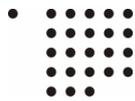
<b>VORWORT</b>	<b>3</b>
<b>1 PROJEKTPARTNER</b>	<b>10</b>
1.1 Der Aggerverband	10
1.2 Fachhochschule Köln, Campus Gummersbach	11
<b>2 ARGUMENTE FÜR EINE KANALNETZSTEUERUNG, LITERATURRECHERCHE</b>	<b>12</b>
<b>3 PROJEKTZIELE UND FESTLEGUNG VON PRIORITÄTEN BEI DER KANALNETZSTEUERUNG</b>	<b>15</b>
<b>4 AUSWAHL KANALNETZ MIT BETRIEBSPUNKTEN</b>	<b>17</b>
<b>5 VORSTELLUNG EINZELNER BETRIEBSPUNKTE, RÜB-BAUFORMEN, MESSSTELLEN</b>	<b>20</b>
5.1 Messcontainer	26
5.1.1 Messgerinne	28
5.1.2 Probenahme-Einrichtung	30
5.1.3 Schaltschrank und SPS-Display /-Eingabefeld	31
5.2 Laboranalytik	31
5.3 Online Messtechnik	32
5.3.1 Messverfahren für Ammoniumstickstoff	33
5.3.2 Messverfahren für chemischen Sauerstoffbedarf	34
5.3.3 Arbeitsaufwand Wartung	35
5.3.4 Automatische Reinigungseinrichtung	37
5.3.5 Ergebnisse der Messtechnik im Kanalsystem	40
5.4 Messtechnik Niederschlag	45
5.4.1 Aufbau des Niederschlag-Messfelds	45
5.4.2 Vorstellung der Messverfahren	47
5.4.3 Vergleich der Niederschlagsmessungen	48
5.4.4 Berechnung der Zeiten bis zur Wirksamkeit von Niederschlägen	51
5.5 Pumpentechnik	51
5.5.1 Pumpe im Ablauf zur Kläranlage (Kanal)	52
5.5.2 Pumpe zur Probenahme „Entlastung RÜB“	55
<b>6 ANALYSE DES IST-ZUSTANDS</b>	<b>57</b>



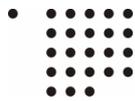
<b>6.1</b>	<b>Kennzahlen der Bestandsaufnahmen</b>	<b>57</b>
<b>6.2</b>	<b>Mittlere CSB-Konzentration im Kanal</b>	<b>59</b>
<b>6.3</b>	<b>Abschätzung der Entlastungsrate bezogen auf die CSB-Fracht</b>	<b>60</b>
<b>6.4</b>	<b>Mittlere CSB-Konzentration der Entlastungen</b>	<b>60</b>
<b>6.5</b>	<b>Mittlere AFS-Konzentration der Entlastungen</b>	<b>62</b>
<b>6.6</b>	<b>NH<sub>4</sub>-N- und NH<sub>3</sub>-N-Konzentrationen der Entlastungen</b>	<b>63</b>
<b>6.7</b>	<b>Regionalanalyse</b>	<b>65</b>
<b>7</b>	<b>SIMULATION KLÄRANLAGE</b>	<b>68</b>
<b>7.1</b>	<b>Fuzzy-Regelung</b>	<b>75</b>
<b>7.2</b>	<b>Ergebnisse der Kläranlagen-Simulation</b>	<b>76</b>
7.2.1	Auswertung der Sankey-Diagramme	76
7.2.2	Ergebnisse	78
<b>8</b>	<b>SIMULATION KANALNETZ</b>	<b>81</b>
<b>8.1</b>	<b>Ausgangsdaten des Kanalnetzes</b>	<b>81</b>
<b>8.2</b>	<b>Belastung und Potenzial der Becken</b>	<b>86</b>
<b>8.3</b>	<b>SWMM<sup>®</sup> Modell</b>	<b>87</b>
<b>8.4</b>	<b>SIMBA<sup>®</sup> Modell</b>	<b>89</b>
8.4.1	Kalibrierung im SIMBA <sup>®</sup> Modell	93
8.4.2	Visuelle Auswertung des Kanalnetzes mit dem SWMM <sup>®</sup> Monitor	96
<b>8.5</b>	<b>Kalibrierung der Kanalnetz-Simulation</b>	<b>99</b>
<b>8.6</b>	<b>Ergebnisse der Kanalnetzsimulation</b>	<b>101</b>
<b>9</b>	<b>ENTWURF DER STEUERSTRATEGIE UND DER VERBUNDSTEUERUNG</b>	<b>110</b>
<b>9.1</b>	<b>Der Zustandsgenerator für die hydraulische Regelung – Stufe 1</b>	<b>115</b>
<b>9.2</b>	<b>Fuzzy-Regler</b>	<b>120</b>
<b>9.3</b>	<b><i>Aufbau der Fuzzy-Regelung im Kanalnetz Homburg-Bröl</i></b>	<b>123</b>
9.3.1	Grunddaten des Reglers	124
9.3.2	Fuzzy-Regler-Optimierung mittels Genetischer Algorithmen	126
9.3.3	Funktion des Fuzzy-Reglers im Zustand 5 und 7	129
<b>9.4</b>	<b>Auswertungs- und Kontrollmöglichkeiten mit dem SWMM<sup>®</sup> Monitor</b>	<b>130</b>
9.4.1	Untersuchungen zur Auslastung des Kanalnetzes unter Einsatz des Reglers	131



<b>10 DATENÜBERTRAGUNG, -DICHTER, -AUSWERTUNG, -AUFZEICHNUNG</b>	<b>135</b>
10.1 Systemaufbau der Datenübertragung	135
10.2 Standleitung, ISDN-Anwahl, GSM/GPRS/UMTS, DSL	137
10.2.1 Analoge Standleitungen	138
10.2.2 ISDN mit Anwahl durch Modem	138
10.2.3 DSL-Verbindungen	139
10.2.4 GPRS / UMTS	140
10.2.5 Empfehlungen	141
10.3 KANNST-SPS	141
<b>11 MAßNAHMEN GEGEN FEHLSTEUERUNGEN - SICHERHEITSKONZEPT</b>	<b>145</b>
11.1 Strategie im Störfall	145
11.2 Realisierung von Sicherheitsebenen	147
11.2.1 PDV	147
11.2.2 Regler-PC	147
11.2.3 KANNST-SPS	148
11.2.4 RÜB-Steuerung	148
11.3 Fazit Sicherheitskonzept	149
<b>12 SOFTWAREUMGEBUNG IPOIN</b>	<b>150</b>
12.1 iPCOIN Server	150
12.2 iPCOIN Client	151
12.3 Ein iPCOIN Programm	151
12.4 Umsetzung der Kanalnetzregelung in iPCOIN	152
12.4.1 Messwernerfassung und Vorverarbeitung	153
12.4.2 Vorverarbeitung, Datensynchronisation und Datenbankexport	154
12.4.3 KOSTRA Berechnung	156
12.4.4 StateMachine für Sommer-/Winterbetrieb	157
12.4.5 Berechnung der Drosselstellwerte für den Strang Nümbrecht	157
12.4.6 Berechnung der Drosselstellwerte für den Waldbröler Strang	159
12.4.7 Stellwertausgabe	160
12.5 Technische Sicherheitsmaßname	160
<b>13 VERFÜGBARKEIT DES MESSMEDIUMS</b>	<b>162</b>
<b>14 MESSSTATIONEN GEWÄSSER</b>	<b>166</b>
14.1 Containeraufbau und Inbetriebnahme	167



<b>14.2</b>	<b>Auswertung Gewässer-Container</b>	<b>168</b>
<b>15</b>	<b>KAMERA-EINSATZ</b>	<b>172</b>
15.1	Kameratechnik	172
15.2	Kamera am RÜB Talstraße	173
15.3	Kamera am RÜB Kalkofen	174
<b>16</b>	<b>PROGNOSE DER BELASTUNG DES KLÄRANLAGENZULAUFES MIT KÜNSTLICHEN NEURONALEN NETZEN</b>	<b>175</b>
16.1	Künstliche neuronale Netze	175
16.2	Prognose der Durchflusswassermenge im Kläranlagenzulauf	176
16.3	Prognose der NH <sub>4</sub> -N-Konzentration im Kläranlagenzulauf	184
16.4	Prognose der CSB-Konzentration im Kläranlagenzulauf	187
16.5	Ergebnis der Prognosen	190
<b>17</b>	<b>ANWENDUNG DER STEUERSTRATEGIE</b>	<b>191</b>
17.1	Regler Stufe 1 – optimierte hydraulische Regelung	191
17.2	Die zwei Phasen im Regler Stufe 2	191
17.3	Stufe 2 - Sommer- und Winterbetrieb	193
17.3.1	Sommerbetrieb - Gewässerorientierte Steuerung abhängig von Konzentrationsspitzen	196
17.3.2	Winterbetrieb - Steuerung abhängig von Schmutzstoff-Frachteinträgen	197
17.3.3	Der Zustandsgenerator für Stufe 2	200
17.3.4	Die Fuzzy-Regler für Stufe 2	203
17.4	Regler Stufe 3 – Regelung nach Online-Messungen	206
17.4.1	Der Zustandsgenerator für Stufe 3	206
17.4.2	Umsetzung Stufe 3- Regelung nach Online-Messungen	208
17.5	Einbindung der Kläranlage in eine integrierte Kanalnetzsteuerung	209
17.5.1	Hydraulische Einbindung der KA	209
17.5.2	Strangregelung	210
17.5.3	Stoffliche Einbindung der KA	213
17.5.4	Phosphat-Regelung – KA Homburg Bröl	215
17.6	Probeprobereitung TMS (Hach Lange GmbH) für PO <sub>4</sub> -P-Messung	216
17.7	Geplante Umsetzung der Regelung	217



<b>18 AUSWERTUNG DER STEUERSTRATEGIE UND NACHWEIS DER EINHALTUNG DER WASSERRECHTLICHEN VORGABEN</b>	<b>218</b>
<b>18.1 Verhalten des Reglers im Kanalnetz</b>	<b>218</b>
18.1.1 Vorgehensweise für die Auswertung der Steuerstrategie	219
<b>18.2 Regelungspotenzial und Auswertung der Messwerte in Stufe 1</b>	<b>226</b>
18.2.1 Langzeitauswertung der Messdaten und Nachweis der Einhaltung der wasserrechtlichen Vorgaben	229
<b>18.3 Auswertung Regler Stufe 2 - Fracht-/Konzentrations-Regler (Sommer- und Winterbetrieb)</b>	<b>230</b>
<b>18.4 Auswertung Stufe 3 - Regelung nach NH<sub>4</sub>-N-Online-Messungen im Vergleich mit Stufe 1 + 2</b>	<b>237</b>
<b>19 KOSTENERMITTLUNG UND VERGLEICH DER ALTERNATIVEN</b>	<b>243</b>
<b>19.1 Abschätzung Arbeitsaufwand</b>	<b>245</b>
<b>19.2 Betriebsaufwand Onlinemessungen</b>	<b>247</b>
<b>20 ZUSAMMENFASSUNG</b>	<b>248</b>
<b>21 ANHANG</b>	<b>251</b>
<b>21.1 Gegenüberstellung der Projektziele und durchgeführten Arbeiten bzw. Ergebnisse</b>	<b>251</b>
<b>21.2 Auswertungen für den zeitlichen Arbeitsaufwand der Online-Messungen im Kanal</b>	<b>254</b>

# 1 Projektpartner

Das Forschungsprojekt wurde vom Aggerverband als Projektträger und der Fachhochschule Köln, Campus Gummersbach als Forschungsinstitut gemeinsam beantragt.

## 1.1 Der Aggerverband

Die Wasserwirtschaft ist eine komplizierte und lebenswichtige Aufgabe. Im Jahre 1923 schlossen sich deshalb Industrie, Gewerbebetriebe und verschiedene Genossenschaften im Aggergebiet zur Aggertalsperren-Genossenschaft zusammen. Aus dieser Genossenschaft entstand zwanzig Jahre später der Aggerverband als Körperschaft des öffentlichen Rechts. Damit liegt die Wasserwirtschaft seit 1943 in den Händen des Aggerverbands - und ist hier dank langjähriger Erfahrung und modernster Technik bestens aufgehoben.

Das Verbandsgebiet erstreckt sich über eine Fläche von insgesamt 1.091,9 km<sup>2</sup> in dem rd. 350.000 Einwohner leben. Mitglieder des Verbandes sind Kreise, Städte, Gemeinden, öffentliche Versorgungsunternehmen und Industrieunternehmen.

Die Aufgaben des Aggerverbands sind:

- Regelung des Wasserabflusses einschließlich Hochwasserschutz
- Unterhaltung oberirdischer Gewässer
- Renaturierung ausgebauter oberirdischer Gewässer
- Minimierung der Auswirkungen von Veränderungen des Grundwasserstandes
- Beschaffung und Bereitstellung von Wasser zur Trink- und Betriebswasserversorgung sowie zur Ausnutzung der Wasserkraft
- Abwasserbeseitigung
- Entsorgung der betrieblichen Abfälle
- Minimierung der Auswirkungen von Abwassereinleitungen auf das oberirdische Wasser
- Ermittlung der wasserwirtschaftlichen Verhältnisse

Zahlen und Fakten:

<i>Talsperren und Stauanlagen</i>	Stauinhalt Mio. m <sup>3</sup>
Aggertalsperre	19,3
Genkeltalsperre (einschl. Badinghagen)	8,2
Wiehltalsperre	31,7
vier Stauweiher	0,7
	59,9
<i>Abwasserreinigung</i>	
Kläranlagen	32
Abwasserpumpwerke	12
Regenüberlaufbecken in Betrieb	158
Regenrückhaltebecken/Bodenfilter	43
Transportsammler	132,1 km
Jahresabwassermenge	ca. 60 Mio. m <sup>3</sup>

## Trinkwasserversorgung

Versorgungsgebiet (einschl. Kreis Altenkirchen)	1.620 km <sup>2</sup>
Einwohner im Versorgungsgebiet	rd. 500.000
Wasserabgabe	ca. 24 Mio. m <sup>3</sup>

## 1.2 Fachhochschule Köln, Campus Gummersbach

Die Fachhochschule Köln verfügt über zwei Zentren in Köln, eins in Leverkusen und ein Zentrum („Campus“) in Gummersbach. Mit rund 19.000 Studierenden und über 700 Professorinnen und Professoren sowie Lehrbeauftragten ist sie die größte Fachhochschule in Deutschland.

Am Campus Gummersbach der Fachhochschule Köln werden ca. 2.500 Studenten in Studiengängen der Informatik, des Maschinenbaus und der Elektrotechnik ausgebildet.

Mit moderner Ausstattung, anwendungsorientierten Lehrangeboten und zahlreichen Forschungs- und Industrieprojekten bietet das Gummersbach Environmental Computing Center am Institut für Automation & Industrial IT der Fachhochschule Köln ein umfassendes Leistungsangebot in Lehre und Forschung.

Die Schwerpunkte von **GECO►C**:

- Automation
- Environmental Engineering
- Biotechnology
- Computer Science

Die enge Zusammenarbeit von Ingenieuren und Informatikern in diesem Team ermöglicht es, Ideen und Erfahrungen unterschiedlicher technischer Wissensgebiete zu neuen Ergebnissen und Produkten für Anwendungen in der Industrie bündeln.

Das Motto der Arbeitsgruppe lautet: „Automation with a human face“.

## 2 Argumente für eine Kanalnetzsteuerung, Literaturrecherche

Kanalnetze werden meistens als unbewirtschaftete Systeme betrieben. Am Ablauf der RÜB werden feste Drosselmengen eingestellt, die jedoch nicht in der Lage sind, auf die natürlichen Schwankungen des Niederschlag-Abflussgeschehens mit einem flexiblen Betriebsverhalten zu reagieren. Weiterhin weicht das Betriebsverhalten der Kanalnetze oft deutlich von dem ursprünglich geplanten ab. Vorgegebene Drosselmengen werden oft nicht eingehalten [GRÜNING 2008<sup>4</sup>].

Das im KANNST Projekt zu entwickelnde Regelsystem soll zu einer besseren Nutzung der verfügbaren Kapazität eines Kanalnetzes führen und damit das Potenzial für einen Rückgang der Entlastungen aufzeigen. Der Gewässerschutz hat bei den Untersuchungen und der Umsetzung die oberste Priorität.

Die Entwicklung der Regelstrategie erfolgt im Projekt in mehreren Schritten. Zuerst wird eine rein hydraulische, volumenabhängige Optimierung der Abflussvorgänge vorgenommen. Im Anschluss daran kommen Frachtbetrachtungen hinzu.

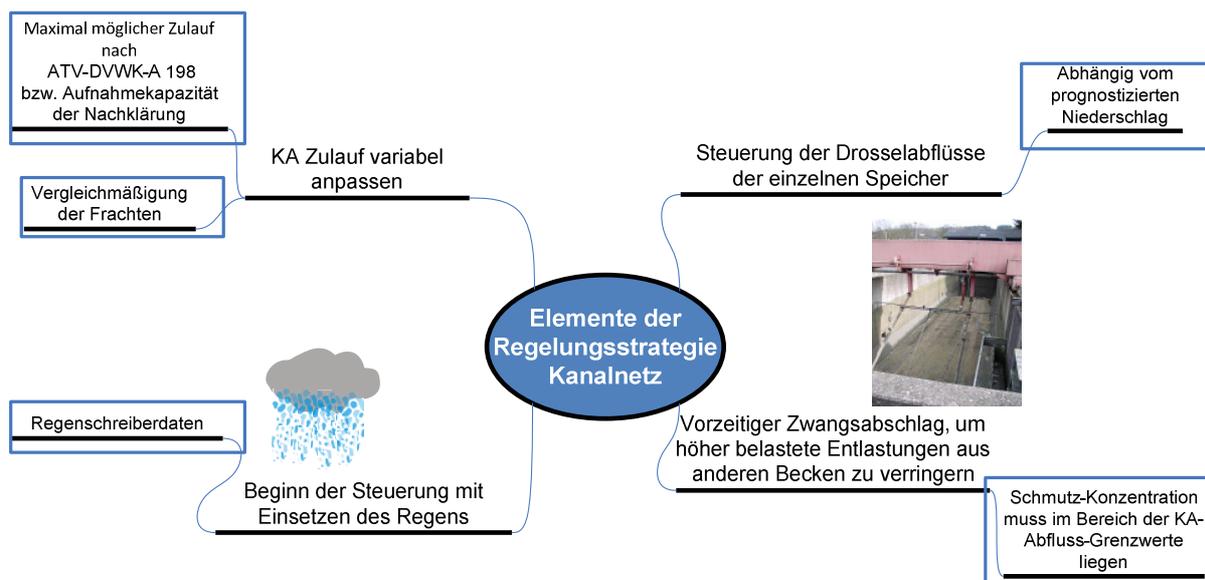
Bei einer Betrachtung von Kanalnetz und Kläranlage als Gesamtsystem können nach GRÜNING und ORTH<sup>5</sup> [2004] folgende Elemente der Steuerungsstrategie genannt werden:

- Steuerung der Drosselabflüsse der einzelnen Speicher, abhängig vom prognostizierten Niederschlag
- Anpassung des KA Zulaufs an die maximale hydraulische Aufnahmekapazität der Nachklärung
- Gezielte Entlastung von Mischwasserströmen bereits im Kanalnetz, bei Schmutzkonzentrationen die im Bereich der KA-Abfluss-Grenzwerte liegen.
- Beginn der Steuerung mit Einsetzen eines Regenereignisses

Diese Elemente wurden als Basis für das KANNST Projekt aufgegriffen und in der folgenden Grafik noch einmal leicht modifiziert zusammengefasst. Die dort vorgestellten vier möglichen Zweige der verfügbaren Elemente der Regelung des Kanalnetzes sind die Ausgangsbasis der Optimierungsstrategie.

<sup>4</sup> Abflusssteuerung – quo vadis? KA Korrespondenz Abwasser, Abfall. 2008 Nr. 4, Hennef

<sup>5</sup> Untersuchungen zur Effizienz einer Verbundsteuerung von Kanalnetz und Kläranlage auf der Basis innovativer Messtechniken. KA- Abwasser, Abfall 2004, (51) Nr.7, Hennef



**Abbildung 1: Mögliche Elemente der Regelungsstrategie**

In der Abbildung 1 sind für das KANNST Projekt die nach dem Stand der Forschung möglichen Elemente dargestellt, die für eine Regelungsstrategie des Kanalnetzes berücksichtigt werden sollen. Diese sind jedoch immer im Kontext bzw. im Verbund mit dem Gewässer, der Kläranlage und der aktuellen Genehmigung zu sehen, da die genannten Elemente Auswirkungen auf diese Teilbereiche haben und, wie bereits erläutert, sich in den einzelnen Optimierungszielen unterscheiden können.

### Randbedingungen

Die Kläranlage darf nur eine genehmigte Menge Abwasser zur Reinigung übernehmen; somit ist der hydraulische Zufluss begrenzt. Für die KA Homburg-Bröl bedeutet dies, dass die maximale Zuflussmenge auf 351 l/s limitiert ist. Die in der Literatur mehrfach beschriebene Möglichkeit ([SEGELKE 2002<sup>6</sup>], [GRÜNING & ORTH 2004] & [ATV-DVWK-A 198<sup>7</sup>]) einer Erhöhung des Zulaufs, die auch nach Abbildung 1 ein Element der Gesamtstrategie des Reglers darstellen kann, ist für das KANNST Projekt nicht realisierbar.

Zwar ist die Nachklärung im Fall der Kläranlage Homburg-Bröl kein Hinderungsgrund (dort wären noch hydraulische Kapazitäten verfügbar), aber nach ersten Gesprächen mit der Bezirksregierung Köln wurde die Erhöhung des KA Zulaufs als mögliches Element der Regelungsstrategie ausgeschlossen.

Daher wird der hydraulische, volumenbezogene Regler im Regenfall einen Teil des Mischwassers im Kanalnetz und in den Regenbecken solange zurückhalten, bis es in der Kläranlage gereinigt werden kann, denn bei einem Regenereignis kann die maximale Kapazität des Kläranlagen-Zulaufes um ein Vielfaches überschritten werden.

<sup>6</sup> Integrierte Bewirtschaftung von Kanalnetz und Kläranlage zur Reduzierung der Gewässerbelastung. Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik der Universität Hannover, Heft 124

<sup>7</sup> Vereinheitlichung und Herleitung von Bemessungswerten für Abwasseranlagen, Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik (GFA), Hennef

Trotz optimaler Ausnutzung der Stauvolumina im Netz wird bei ausgeprägten Starkregenereignissen die Entlastung von Mischwasser nicht zu vermeiden sein.

Für die Einleitung dieses Mischwassers in das Gewässer sind besondere Randbedingungen zu beachten. Nach den derzeitigen Regeln der Technik ist mindestens eine mechanische Behandlung durch Sedimentation für das abzuschlagende Wasser erforderlich. Diese Funktion wird bei korrekter Auslegung von Regenüberlaufbecken wahrgenommen.

Weitere Bedingungen für die Auslegung des Reglers sind durch die Dimensionierung von Regenentlastungen, Regenüberlaufbecken und Stauraumkanälen gemäß dem ATV-Arbeitsblatt DVWK-A 128<sup>8</sup> [1992] der abwassertechnischen Vereinigung vorgegeben.

Dort werden die Grenzen für die zulässige Jahresentlastungsrate ( $e_0$ , Häufigkeit) und einen Mindestanteil für den abfließenden Niederschlag, der einer Abwasserbehandlung zugeführt werden muss, festgelegt. Diese Grenzwerte gilt es einzuhalten.

Im Folgenden werden Grenzen für die integrierte Betrachtung in einer Übersicht zusammengefasst. Diese waren für das KANNST-Projekt maßgebend.

#### ***Grenzen der integralen Betrachtung:***

---

- Keine Überschreitung des Volumens der verfügbaren Kapazitäten im Kanalnetz
- Keine Überschreitung des maximal genehmigten Zulaufs zur KA
- Keine Überschreitung der vorgeschriebenen maximalen Jahresentlastungsmengen
- Keine Überschreitung der zulässigen Jahresentlastungsrate ( $e_0$ )
- Grenzwerte der KA im Ablauf sind einzuhalten
- Ein Mindestanteil des abfließenden Niederschlags muss einer Abwasserbehandlungsanlage zugeführt werden
- Überstauhäufigkeit des Kanalnetzes darf nicht überschritten werden

Diese Vorgaben müssen beachtet werden. Unter Berücksichtigung dieser Rahmenbedingungen sind die Ziele und umzusetzenden Maßnahmen der Regelungsstrategie entwickelt worden.

---

<sup>8</sup> Richtlinien für die Bemessung und Gestaltung von Regenentlastungsanlagen in Mischwasserkanälen. Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik (GFA), St. Augustin

### 3 Projektziele und Festlegung von Prioritäten bei der Kanalnetzsteuerung

Das Forschungsprojekt KANNST startete mit folgenden Zielen:

1. **Verbesserung der Nutzung der vorhandenen RÜB** über eine Optimierung der Steuerung, damit das Stauvolumen optimal ausgenutzt werden kann und ggf. eine Erweiterung dieses Volumens verzichtbar wird.
2. **Harmonisierung der Ansteuerung der RÜB**, so dass Entlastungen von RÜB direkt nach einem Regenereignis (ein RÜB entleert sich und die nachgeschalteten RÜB entlasten noch) vermieden wird.
3. **Vergleichmäßigung der Zulaufkraft zur Kläranlage**. Im Gegensatz zum üblichen Ansatz, die Zulaufmenge zu egalisieren, soll bei der geplanten Steuerstrategie die Ammonium-Belastung und/oder die CSB-Belastung gleichmäßig werden. Dies soll nach neuen Forschungsergebnissen speziell die Belastung des Vorfluters wirkungsvoller als bisher reduzieren.
4. **Optimierung der Zulaufkraft** auf der Basis der zulässigen Ablauf-Konzentrationen (BSB und/oder N-Gesamt bzw. NH<sub>4</sub>-N) der Kläranlage. Als nächster Schritt ist naheliegend, die Kapazität der Kläranlage über die integrierte Regelung von Kanalnetz und Kläranlage optimal zu nutzen. Damit kann der Ablauf entsprechend der vorgegebenen Bemessung eingestellt werden. Weiterhin ist es grundsätzlich möglich, einen variablen Sollwert der Ablaufkonzentration zu fahren, um die jahreszeitlich unterschiedliche Aufnahmefähigkeit des Vorfluters für organische Frachten und Stickstoff zu berücksichtigen.
5. **Integration von selbstlernenden Vorhersage-Komponenten** in die Regelung. In dem Projekt wird untersucht, in wie weit Prognosen mit Hilfe von selbstlernenden neuronalen Netzen möglich sind. Ein analytisches Modell wird hierbei für die Ermittlung der optimalen Konfiguration des Prognose- und Regelsystems verwendet, jedoch nicht für die Prognose selber. Durch die Lernfähigkeit des neuronalen Netzes ist das System relativ einfach auf andere Kanalnetze und Kläranlagen übertragbar.
6. **Radarmessung zur Erfassung des Niederschlages im Einzugsbereich des Kanalnetzes**. Je mehr Messgrößen verfügbar sind, umso zuverlässiger kann das neuronale Netz Zustandsgrößen des Systems berechnen bzw. vorhersagen. Die Antragsteller erwarten von der Integration dieser Messgrößen eine deutliche Verbesserung der Prognosewerte, da Online-Regendaten einer Prognose der Kanalbelastung und damit des Zulaufs der Kläranlage entsprechen.

Im Laufe des Projekts wurden folgende Prioritäten bei der Kanalnetzsteuerung erarbeitet. Grundlage dabei waren die oben genannten Ziele und die während der Projektarbeit erlangten Kenntnisse.

- Optimale hydraulische Ausnutzung der vorhandenen Volumina im Kanalnetz durch gleichmäßige Verteilung der Wassermengen.
- Ammonium-Fracht bzw. -Konzentrationsregelung für einen Sommer- und Winterbetrieb. Je nach Gewässerzustand und Laichzeiten werden die Ammonium-Belastungen unterschiedlich gesteuert.

Zwischen Ziel 1+2 sowie 3+4 besteht aus heutiger Sicht ein Zielkonflikt. Es ist nicht möglich gleichzeitig den Zulauf zu einer Kläranlage zu vergleichmäßigen und das Kanalnetz hydraulisch zu harmonisieren. Da es für einen ganzheitlichen Ansatz, wie er in KANNST verfolgt wird, sinnvoll ist das Abwasser über die Kläranlage zu führen und dort zu behandeln, statt es ungereinigt über das Kanalnetz ins Gewässer zu entlasten, wurden die Ziele 1 und 2 im Projekt umgesetzt. Ziel 3 und 4 wurden nach Auswertungen des Gesamtsystems zugunsten von Ziel 1 und 2 zurückgestellt. Die Kläranlage Homburg-Bröl verfügt über ausreichende hydraulische und biologische Kapazitäten um die evtl. erhöhten Abwassermengen aus dem hydraulisch harmonisierten Kanalnetz aufzunehmen und gereinigt dem Bachlauf zuzuführen.

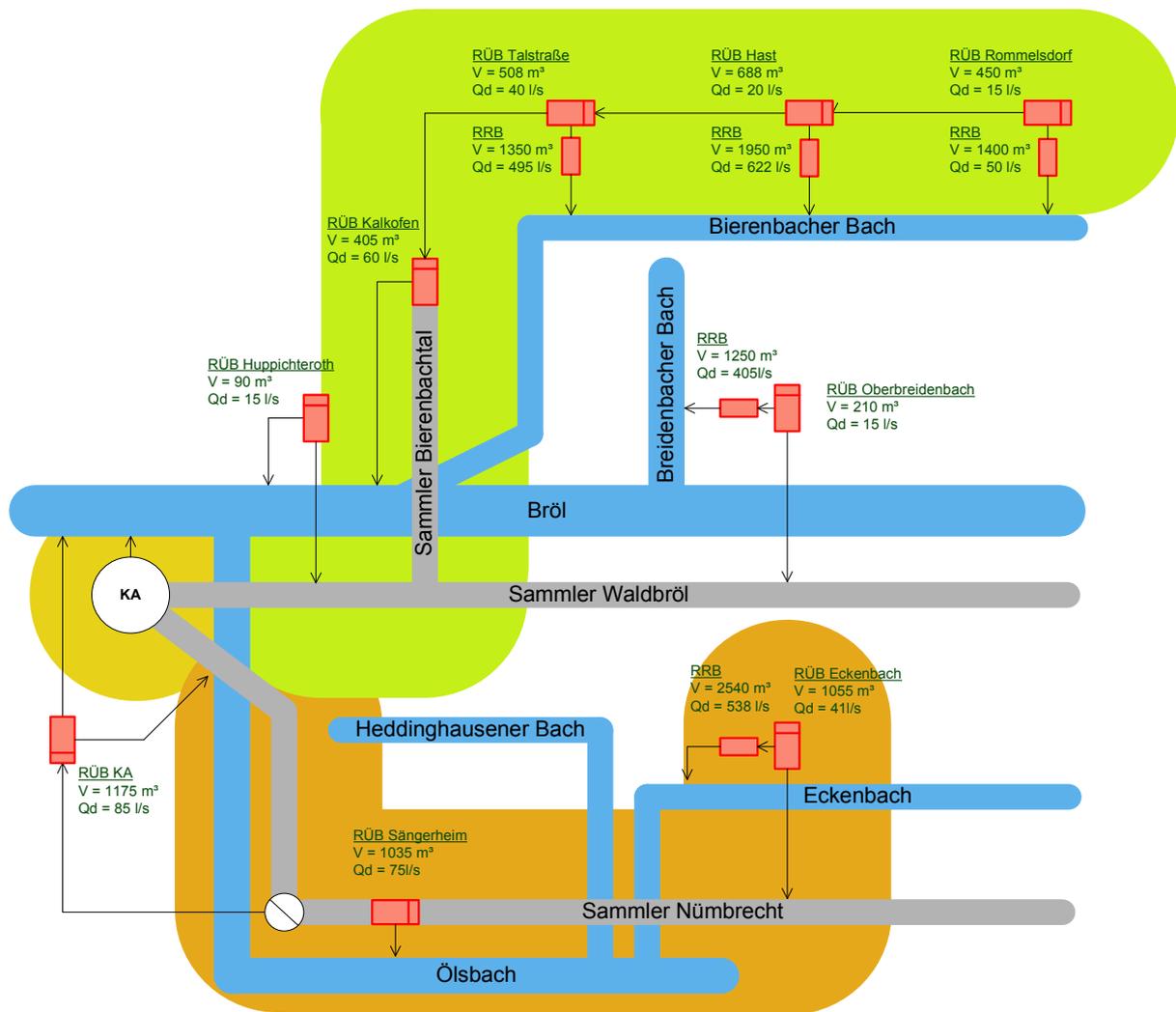
Ziel 5 wurde im Laufe des Projekts untersucht und erarbeitet. Dabei wurden selbstlernende künstliche neuronale Netze (KNN) zur Prognose der Belastung des Kläranlagenzulaufs (Konzentrationen NH<sub>4</sub>-N und CSB) eingesetzt. Die Ergebnisse dieser Vorhersagen waren jedoch nicht ausreichend belastbar für die Integration in eine Gesamt-Regelungsstrategie.

Für Ziel 6 wurden Radarmessungen und verschiedene andere Geräte zur Erfassung des Niederschlags im Projekt erforscht. Dabei sind vor allem Eigenschaften, die eine vorausschauende Regelung unterstützen würden, berücksichtigt worden. Es wurde festgestellt, dass die Erfassung des Niederschlags mit einem Flächenradar für die Optimierung des Niederschlagabflussverhaltens im Gebiet Homburg-Bröl nicht erforderlich ist. Jedoch kann ein Schichtradar, zur Erfassung der Niederschlagsformen (Nieselregen, Schnee,...) in einem Gebiet wie dem Oberbergischen Land sinnvoll sein.

## 4 Auswahl Kanalnetz mit Betriebspunkten

Der Aggerverband betreibt 32 Kläranlagen mit den jeweils kommunal betriebenen vorgeschalteten Kanalnetzen in seinem Verbandsgebiet. Bei der Auswahl des Netzes Homburg-Bröl für eine Kanalnetzsteuerung wurden folgende Aspekte berücksichtigt:

- Die Kläranlage Homburg-Bröl und die Entlastungsbauwerke der Mischwasserbehandlungsanlagen im Einzugsgebiet leiten in die Bröl ein, an die als Lachslachgewässer höchste Anforderungen gestellt werden.
- Die RÜB genügen weitgehend den Anforderungen einer Kanalnetzsteuerung. Sieben von neun RÜB besitzen ein Volumen größer  $500 \text{ m}^3$ , womit ein Regelungspotential für das Kanalnetz Homburg-Bröl angenommen werden kann.
- Von den sieben RÜB mit Regelungspotential sind vor Projektbeginn bereits sechs mit einer induktiven Durchflussmengenmessung (IDM) mit automatischem Drosselorgan ausgestattet. Alle RÜB sind mit mindestens einer Füllstandsmessung und einer Entlastungsmengenmessung ausgestattet.
- Die Infrastruktur zur Kommunikation (Übertragung von Daten, Signalen, Störmeldungen) zwischen den einzelnen RÜB, der Kläranlage und der durchgehend besetzten Leitwarte des Aggerverbandes ist bereits vorhanden. Die Kommunikation erfolgt mittels analoger Wählleitungen.
- Die Ergebnisse des Projektes sollen dazu dienen, die Notwendigkeit geplanter Baumaßnahmen zu belegen (mehrere Retentionsbodenfilter (RBF) waren im Anschluss an die RÜB vorgesehen).
- Bei der Durchsicht der Niederschlagsereignisse fallen regelmäßig Ereignisse auf, bei denen teilweise RÜB vollgefüllt sind und entlasten, während andere Becken im gleichen Strang nur teilgefüllt sind und erhebliche Kapazitäten frei haben.



Strang Waldbröl
  Strang Nümbrecht
  Kläranlage

Abbildung 2: Topographie des gewählten Netzes und der dazugehörigen Betriebspunkte (Schema)

Strang Waldbröl:

1. Rommelsdorf (RÜB / RRB)
2. Hast (RÜB / RRB)
3. Talstraße (RÜB / RRB)
4. Kalkofen (RÜB)

Strang Nümbrecht:

5. Eckenbach (RÜB/RRB)
6. Sägerheim (RÜB)

Kläranlage

7. RÜB Kläranlage

Erschwerend, aber für die angedachte Regelung eine besondere Herausforderung, war auch, dass der Zulauf zur Kläranlage aus 2 Strängen besteht. Diese werden noch vor der Kläranlage durch ein Verbindungsbauwerk zusammengeführt. Bei der Entwicklung der Regelungsstrategie sollte die Verschiebung der Regelkriterien durch den Zustand in Einzelsträngen ebenfalls betrachtet werden.

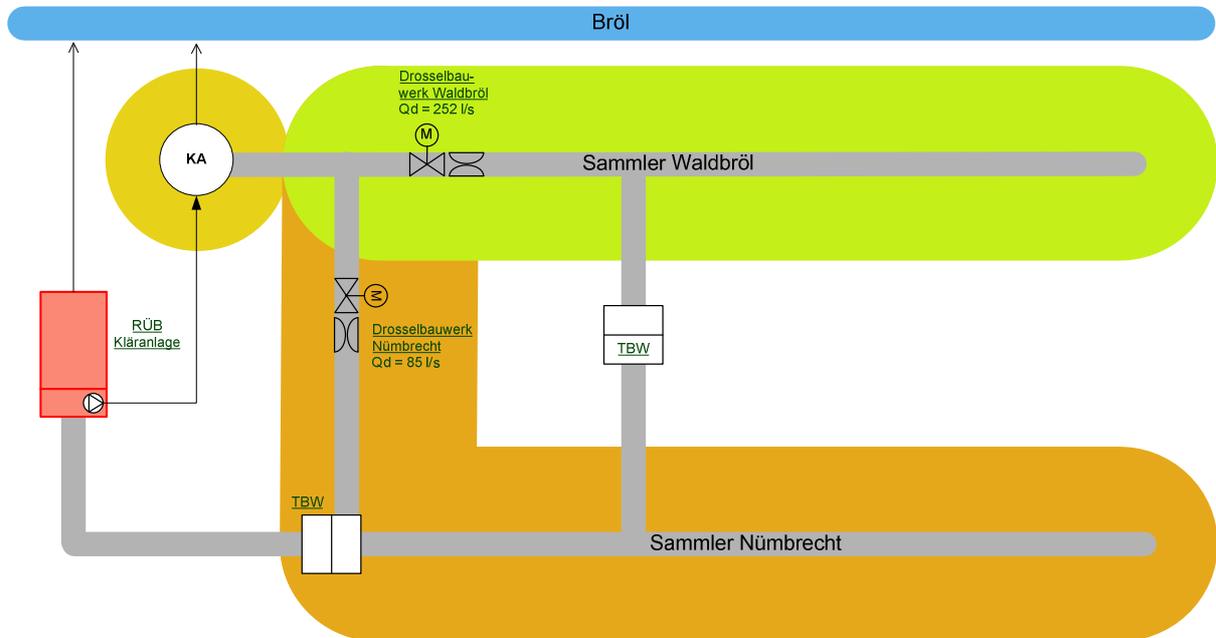


Abbildung 3: Verbindung der Stränge

## 5 Vorstellung einzelner Betriebspunkte, RÜB-Bauformen, Messstellen

Die Darstellung der einzelnen Betriebspunkte erfolgt nachstehend. Die angegebenen Drosselwassermengen sind die, die Gültigkeit hatten, bevor die Regelung in Betrieb gesetzt wurde.

<b>Bezeichnung:</b>	<b>RÜB Rommelsdorf (RÜB / RRB)</b>
Strang:	Waldbröl
Bauform:	Geschlossenes Fangbecken im unechten Nebenschluss mit einer Speicherkammer, Drosselung über MID und Regelschieber. Dem RÜB ist ein RRB nachgeschaltet.
Volumen RÜB:	$V = 500,00 \text{ m}^3$
Volumen RRB:	$V = 1400 \text{ m}^3$
Reduzierte Fläche:	$A_{\text{red}} = 9,46 \text{ ha}$
TW-Abfluss, Tagesspitze:	$Q_{\text{tx ges}} = 3,23 \text{ l/s}$
SW-Abfluss, Tagesspitze:	$Q_{\text{sx ges}} = 2,0 \text{ l/s}$
Drosselwassermenge:	$Q_d = 15 \text{ l/s}$



Abbildung 4: RÜB Rommelsdorf

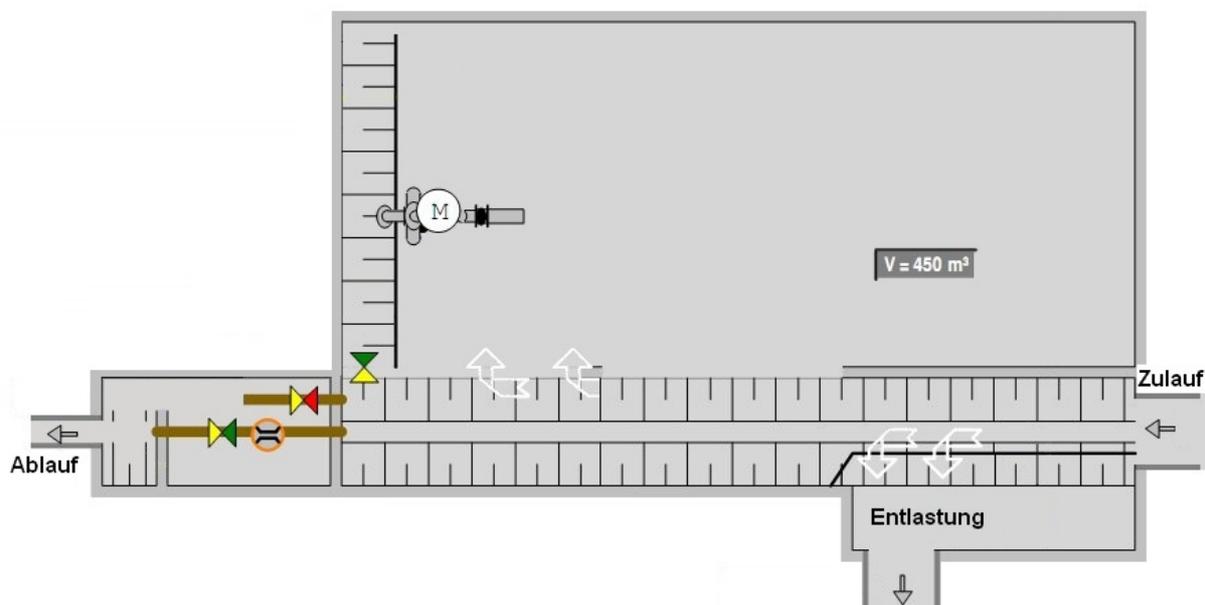


Abbildung 5: Schema RÜB Rommelsdorf

<b>Bezeichnung:</b>	<b>Hast (RÜB / RRB)</b>
Strang:	Waldbröl
Bauform:	Geschlossenes rechteckförmiges Durchlaufbecken im Nebenschluss mit einer Speicherkammer, Drosselung über MID und Regelschieber. Dem RÜB ist ein RRB nachgeschaltet.
Volumen RÜB:	840,00 m <sup>3</sup>
Volumen RRB	1950 m <sup>3</sup>
Reduzierte Fläche:	$A_{red} = 26,03 \text{ ha}$
TW-Abfluss, Tagesspitze:	$Q_{tx \text{ ges}} = 9,57 \text{ l/s}$
SW-Abfluss, Tagesspitze:	$Q_{sx \text{ ges}} = 6,25 \text{ l/s}$
Drosselwassermenge:	$Q_d = 20 \text{ l/s}$



Abbildung 6: RÜB Hast

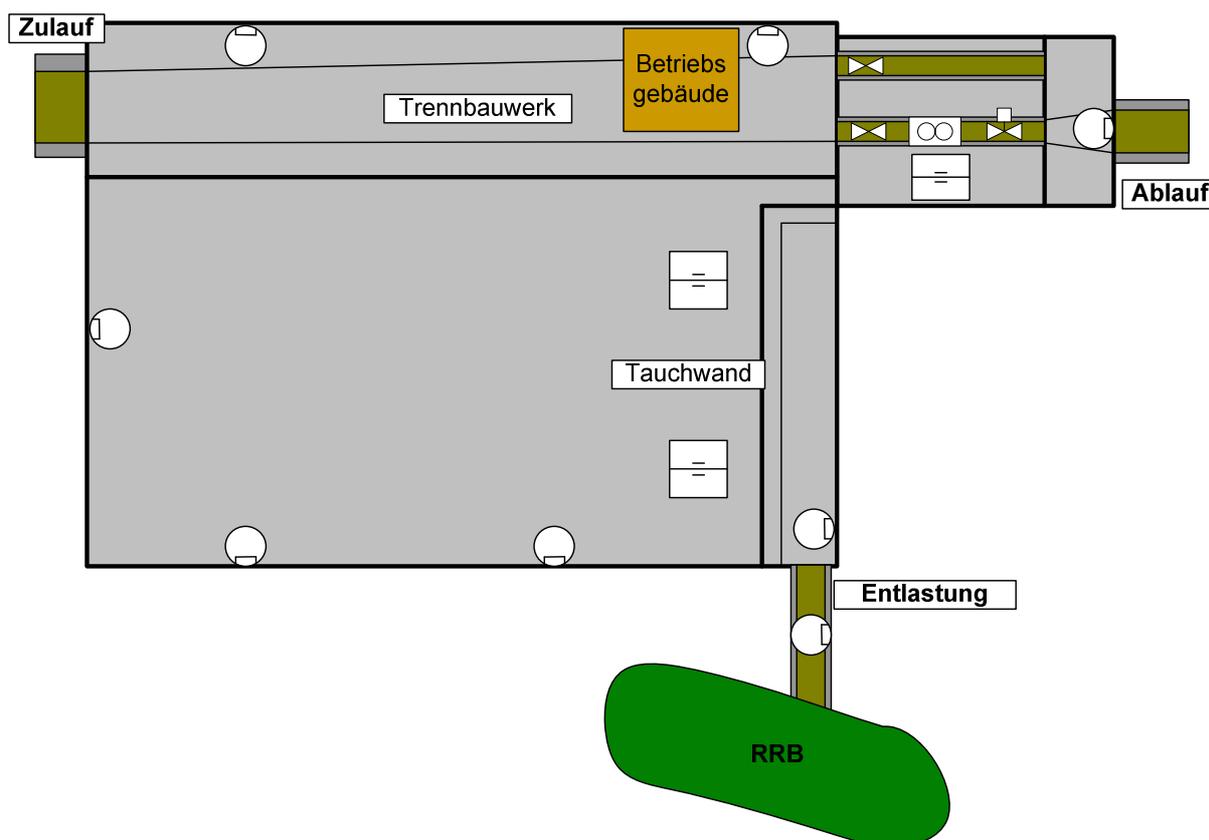


Abbildung 7: Schema RÜB Hast

<b>Bezeichnung:</b>	<b>Talstraße (RÜB / RRB)</b>
Strang:	Waldbröl
Bauform:	Geschlossenes rechteckförmiges Durchlaufbecken im Nebenschluss mit einer Speicherkammer, Drosselung über MID und Regelschieber. Dem RÜB ist ein RRB nachgeschaltet.
Volumen RÜB:	504 m <sup>3</sup>
Volumen RRB	1350 m <sup>3</sup>
Reduzierte Fläche:	$A_{red} = 35,77 \text{ ha}$
TW-Abfluss, Tagesspitze:	$Q_{tx \text{ ges}} = 13,70 \text{ l/s}$
SW-Abfluss, Tagesspitze:	$Q_{sx \text{ ges}} = 9,20 \text{ l/s}$
Drosselwassermenge:	$Q_d = 40 \text{ l/s}$



Abbildung 8: RÜB Talstraße

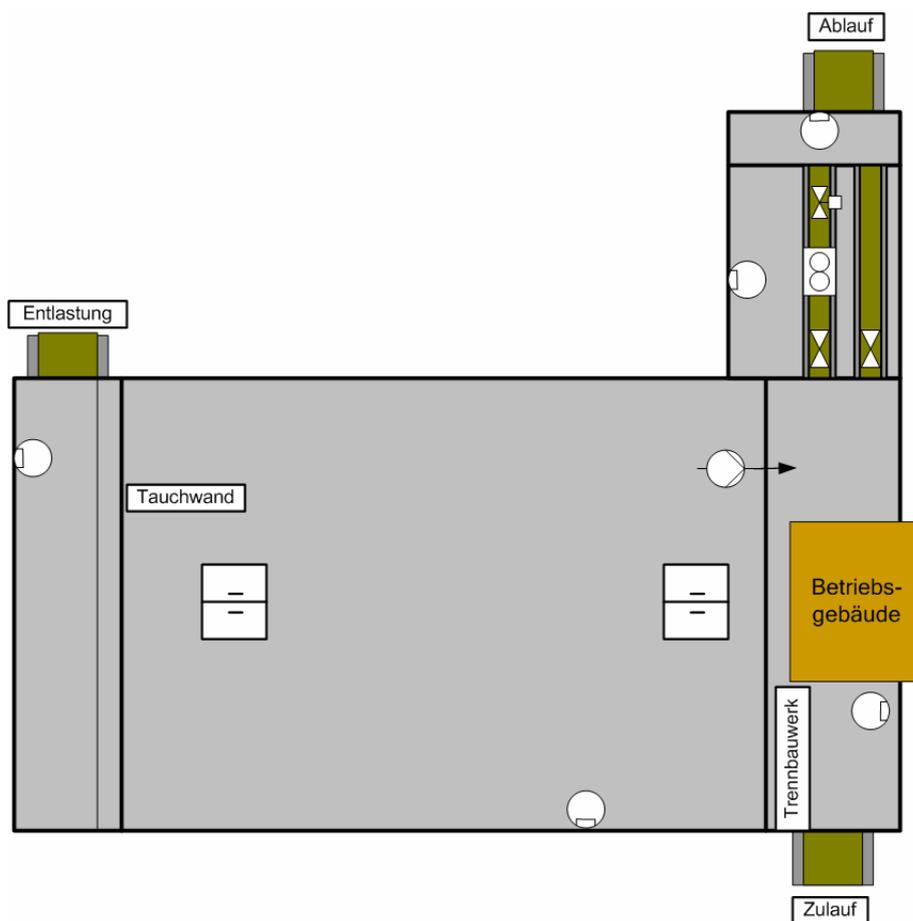


Abbildung 9: Schema RÜB Talstraße

<b>Bezeichnung:</b>	<b>Kalkofen</b>
Strang:	Waldbröl
Bauform:	Offenes rechteckförmiges Durchlaufbecken im Nebenschluss mit zwei Speicherkammern, Drosselung über MID und Regelschieber.
Volumen RÜB:	407,00 m <sup>3</sup>
Volumen RRB:	-
Reduzierte Fläche:	$A_{red} = 43,83 \text{ ha}$
TW-Abfluss, Tagesspitze:	$Q_{tx \text{ ges}} = 16,72 \text{ l/s}$
SW-Abfluss, Tagesspitze:	$Q_{sx \text{ ges}} = 11,55 \text{ l/s}$
Drosselwassermenge:	$Q_d = 60 \text{ l/s}$



Abbildung 10: RÜB Kalkofen

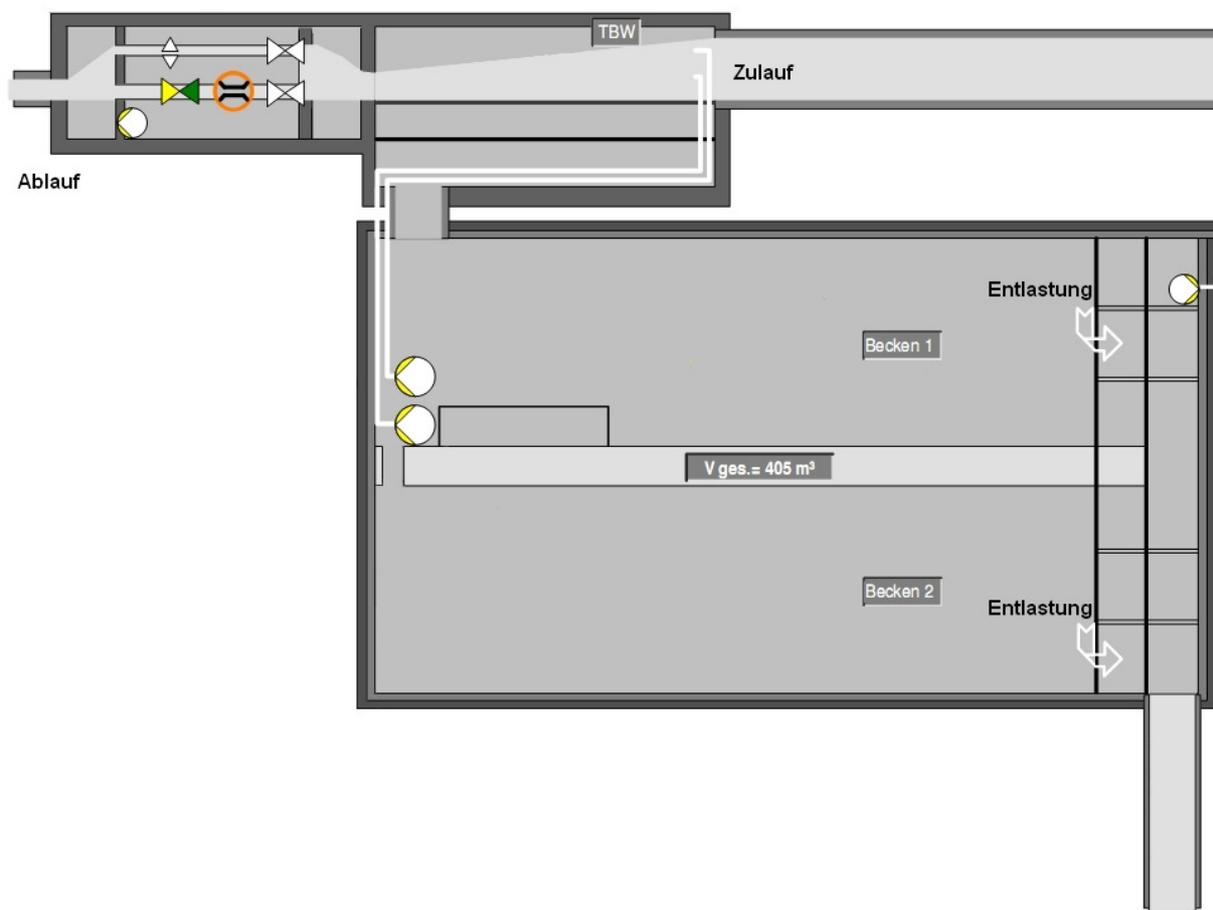


Abbildung 11: Schema RÜB Kalkofen

<b>Bezeichnung:</b>	<b>Eckenbach (RÜB / RRB)</b>
Strang:	Nümbrecht
Bauform:	Kreisförmiges geschlossenes Durchlaufbecken im Hauptschluss mit einer Speicherkammer, Drosselung über MID und Regelschieber. Dem RÜB ist ein RRB nachgeschaltet.
Volumen RÜB:	1000,00 m <sup>3</sup>
Volumen RRB:	2540 m <sup>3</sup>
Reduzierte Fläche:	$A_{red} = 26,15 \text{ ha}$
TW-Abfluss, Tagesspitze:	$Q_{tx \text{ ges}} = 13,52 \text{ l/s}$
SW-Abfluss, Tagesspitze:	$Q_{sx \text{ ges}} = 10,12 \text{ l/s}$
Drosselwassermenge:	$Q_d = 41 \text{ l/s}$



Abbildung 12: RÜB Eckenbach

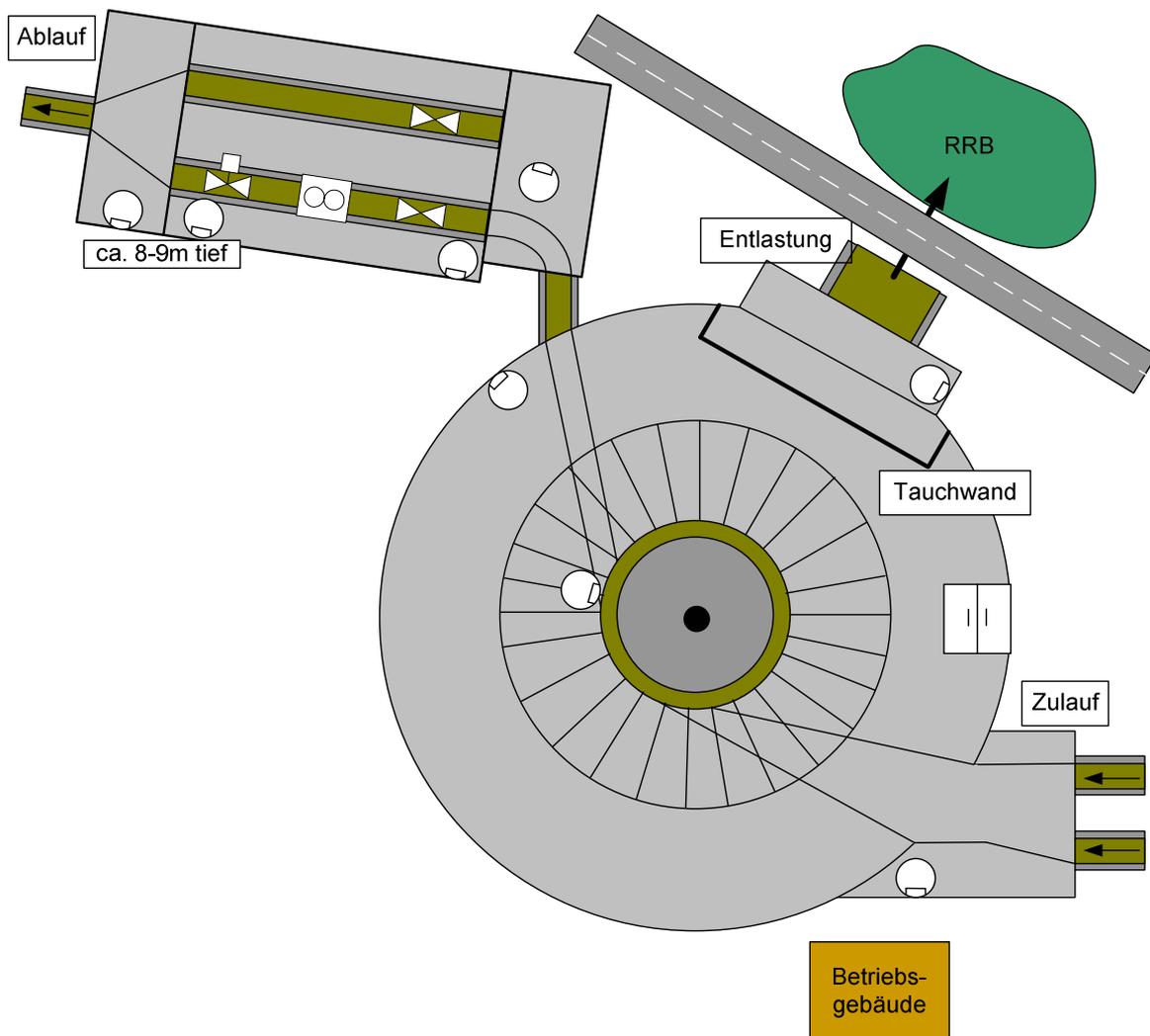


Abbildung 13: Schema RÜB Eckenbach

<b>Bezeichnung:</b>	<b>Sängerheim (RÜB)</b>
Strang:	Nümbrecht
Bauform:	Geschlossenes rechteckförmiges Durchlaufbecken im Nebenschluss mit einer Speicherkammer, Drosselung über MID und Regelschieber.
Volumen RÜB:	1020,00 m <sup>3</sup>
Volumen RRB:	-
Reduzierte Fläche:	$A_{red} = 82,62 \text{ ha}$
TW-Abfluss, Tagesspitze:	$Q_{tx \text{ ges}} = 39,54 \text{ l/s}$
SW-Abfluss, Tagesspitze:	$Q_{sx \text{ ges}} = 30,55 \text{ l/s}$
Drosselwassermenge:	$Q_d = 75 \text{ l/s}$



Abbildung 14: RÜB Sängerheim

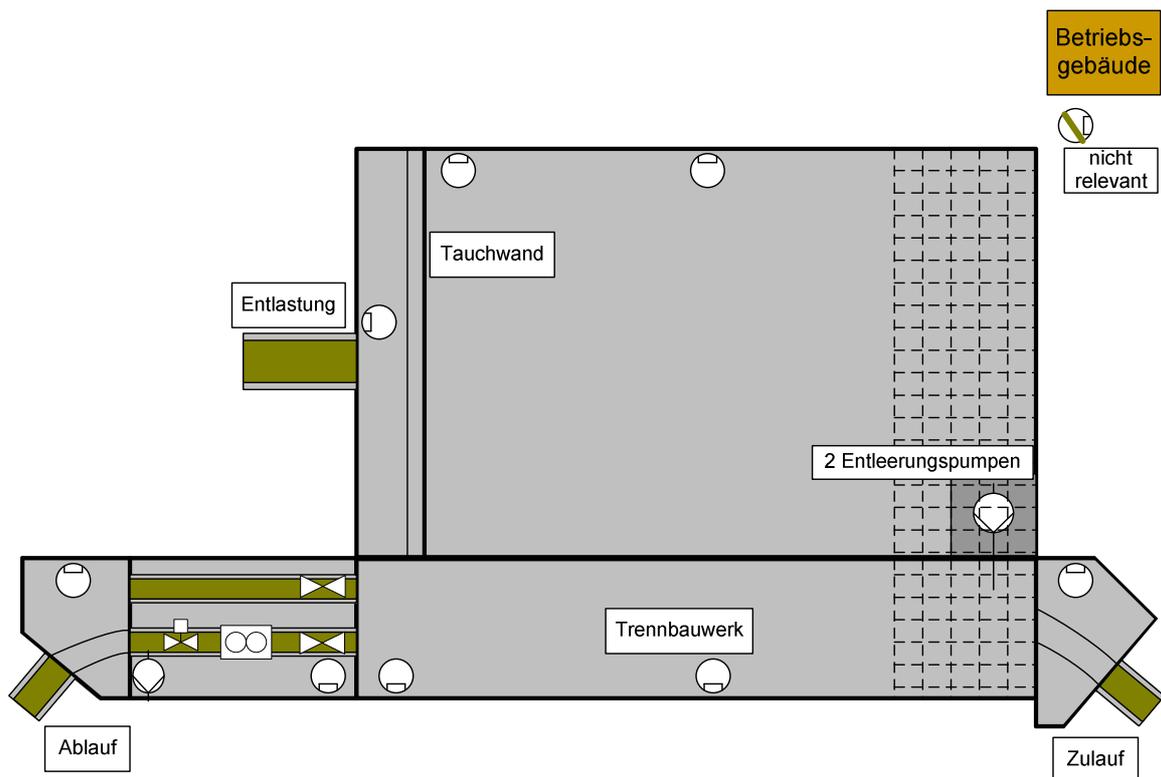


Abbildung 15: Schema RÜB Sängerheim

<b>Bezeichnung:</b>	<b>Kläranlage (RÜB)</b>
Strang:	Nümbrecht
Bauform:	Offenes rechteckförmiges Durchlaufbecken im Nebenschluss mit drei Speicherkammern, Drosselung über MID und Regelschieber.
Volumen:	1100 m <sup>3</sup>
Volumen RRB:	-
Reduzierte Fläche:	$A_{red} = 88,89$ ha
TW-Abfluss, Tagesspitze:	$Q_{tx\ ges} = 42,11$ l/s
SW-Abfluss, Tagesspitze:	$Q_{sx\ ges} = 32,31$ l/s
Drosselwassermenge:	$Q_d = 85$ l/s



Abbildung 16: RÜB Kläranlage

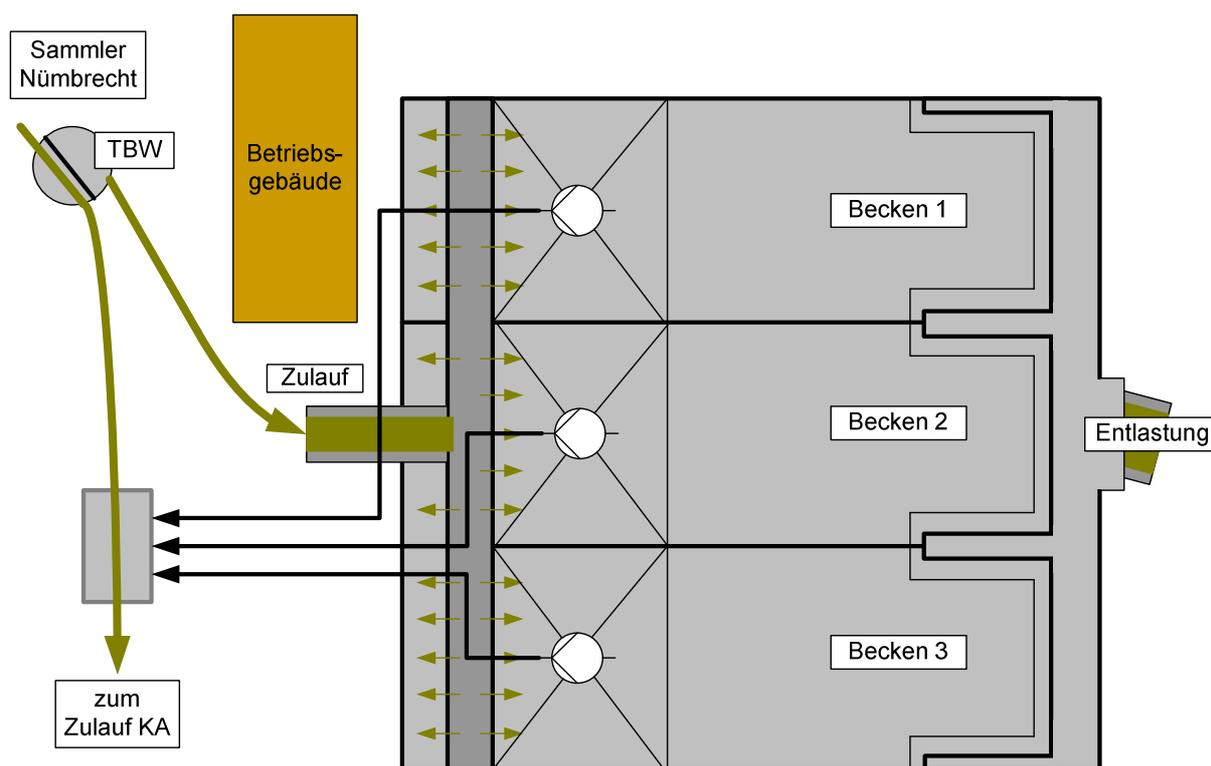


Abbildung 17: Schema RÜB Kläranlage

## 5.1 Messcontainer

Im Projekt KANNST ist aufgrund der eingeschränkten Platzverhältnisse in den Kanälen und der geringen Wassermengen bei Trockenwetter entschieden worden, dass die Frachtmessungen nicht direkt im Kanal, sondern in einem Bypass-System erfolgen sollen. In diesem System wird das Abwasser aus dem Kanal in ein Messgerinne gepumpt und von dort aus wieder zurück in den Kanal geführt.

Für das KANNST-Projekt sind sieben Messcontainer (Außenmaß 3.050 x 2.170 x 2.470 mm) aus verzinktem Stahlblech beschafft und an den Betriebspunkten platziert worden. Während der Laufzeit des Projektes befand sich jeweils einer dieser Container auf jedem in die Kanalnetzsteuerung einbezogenen RÜB. Die Aufstellung erfolgte in unmittelbarer Nähe zum jeweiligen RÜB-Betriebsgebäude. Dieses beinhaltet die Stromversorgung, die Steuerung und die Messtechnik des dazugehörigen RÜB. Der Containeraufbau wurde soweit als möglich standardisiert und beinhaltete in der Regel folgende Komponenten:

Zwei parallel angeordnete Messgerinne, eine Kühleinheit mit dem integrierten Probenehmer (bei zwei Messgerinnen auch mit zwei getrennten Entnahmeeinheiten) und einen Schaltschrank.

Die Container sind isoliert, beheizt und belüftet. Die Heizung übernimmt den Frostschutz und verhindert so das Einfrieren von Messmedium, Schläuchen und Sensoren im Winter. Bei hoher Luftfeuchtigkeit wird über ein Hygrometer ein Lüfter zugeschaltet um die feuchte Luft des Innenraumes (entstehend durch die offenen Wasseroberflächen in den Gerinnen) abzusaugen und so einer Kondensation und der daraus entstehenden Nässe mit evtl. Folgeschäden, vorzubeugen.



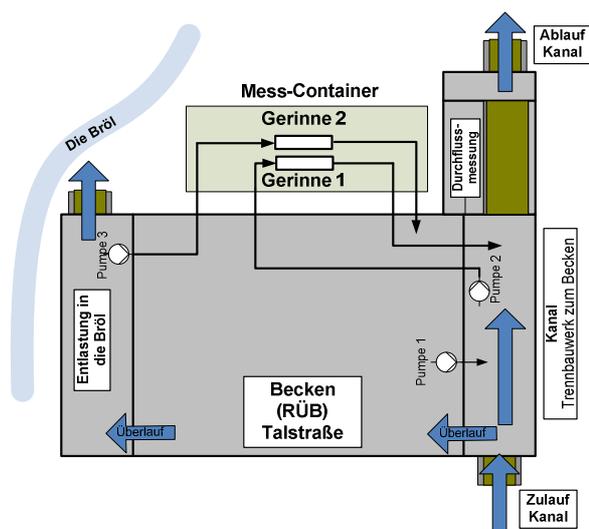
**Abbildung 18 a+b: Außen- und Innenansicht des Messcontainers**

Beispielhaft ist in Abbildung 19 das RÜB Talstraße dargestellt.

Funktionsbeschreibung:

Im Regenwetterfall füllt sich das im Nebenschluß betriebene Becken über das Trennbauwerk. Bei länger anhaltenden Regenereignissen wird das maximale Stauziel im Becken erreicht und es kommt zur Entlastung in das Gewässer.

Über die Pumpen 2+3 kann das Messmedium den Messgerinnen zugeführt werden. Dort erfolgt die Onlinemessung und bei Bedarf eine weitere Probenentnahme für externe Analytik.



**Abbildung 19: RÜB-Schema mit Messgerinne für den Durchfluss im Kanal (Gerinne 1) und den Überlauf ins Gewässer (Gerinne 2)**

Bei der dargestellten Pumpe 1 handelt es sich um die Beckenentleerungspumpe, die bei absinkendem Wasserstand im Trennbauwerk den Beckeninhalt wieder in das Abwassersystem zurückführt.

Durch die seitliche Anordnung des Schaltschranks mit dem Bedienfeld und dem automatischen Probennehmer ist für ausreichende Platzverhältnisse im Eingangsbereich gesorgt.

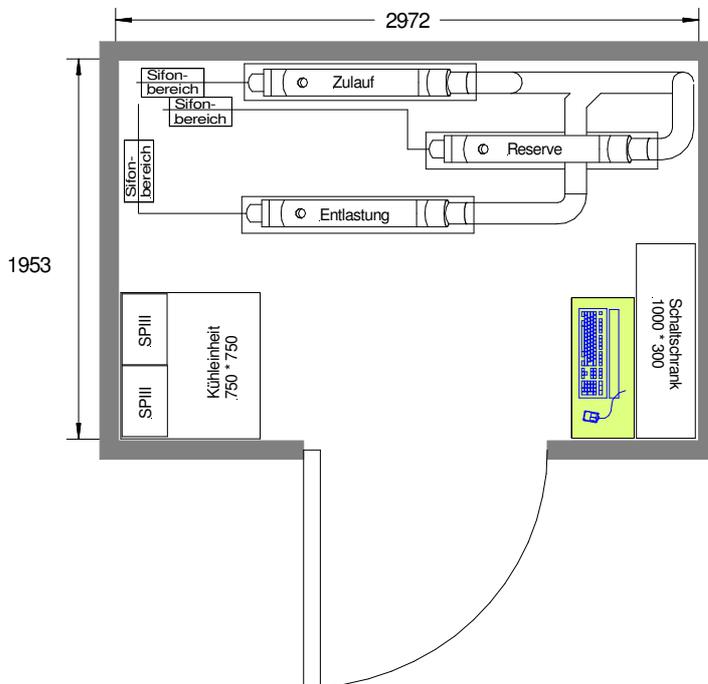


Abbildung 20: Raumaufteilung Messcontainer

### 5.1.1 Messgerinne

Im KANNST-Projekt werden Edelstahl-Wannen, so genannte Messgerinne als Vorlage-Behälter für Sonden und Probennehmer eingesetzt. In jedem Messcontainer gibt es jeweils ein Gerinne für das Messmedium „Abwasser Kanal“ (Gerinne 1) und eines für „Entlastung“ (Gerinne 2). Durch den Einsatz der Gerinne wurden leicht zugängliche Messstellen geschaffen. Die Anordnung der Pumpen und die vollständigen Fließwege der Messmedien werden im nachfolgenden Kapitel Pumpentechnik erläutert.

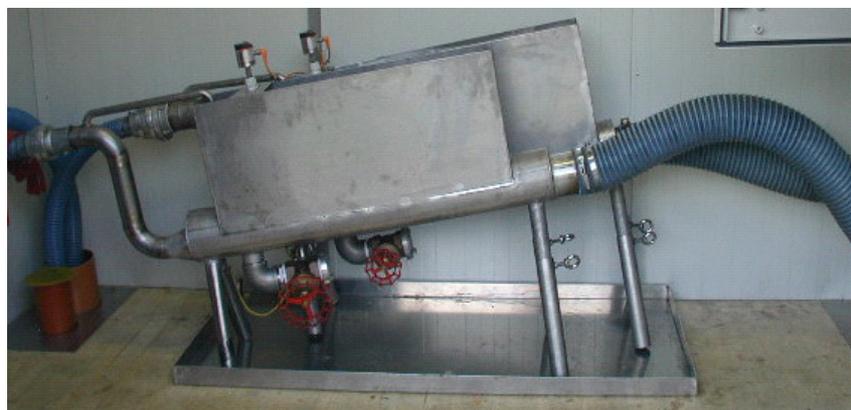


Abbildung 21a+b: Messgerinne zur Beprobung von Entlastung und Ablauf

Das Messmedium strömt auf der linken (tiefen) Seite ein, passiert die Sensoren und verlässt das Behältnis nach rechts über die blauen Schläuche am Hochpunkt des Gerinnes. Sedimente im Gerinne werden mit Hilfe eines „Spülprogramms“ in den meisten Fällen wirkungsvoll beseitigt.

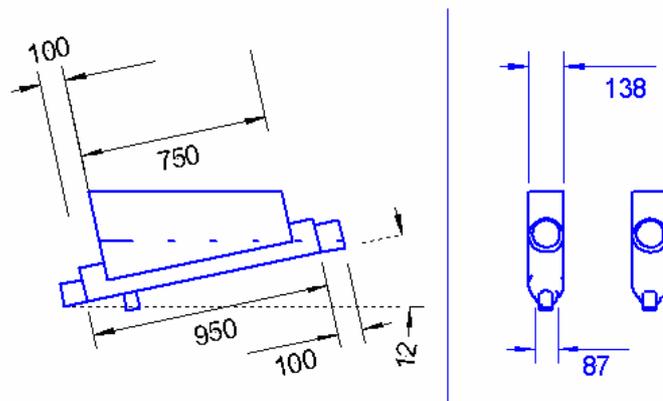


Abbildung 22: Schema Messgerinne

Dazu werden die Förderpumpen mehrfach, in drei wählbaren Zeitfenstern ein- und ausgeschaltet. Mit Ausschaltender Pumpe läuft der Inhalt des Gerinnes zurück und reißt das Sediment mit. Mit Einschalten der Pumpe werden Reststoffe neu aufgewirbelt und beim nächsten Zyklus ausgetragen. Nach der gewählten Anzahl an Intervallen wird wieder auf Messbetrieb umgeschaltet. Das Spülprogramm mit mindestens 3 Zyklen hat sich während der Projektlaufzeit als sehr wirkungsvoll erwiesen.

Die eingesetzten Sonden dürfen bei ausgeschalteten Pumpen nicht trocken fallen. Damit es beim Ausschalten der Fördereinheit nicht zum kompletten Leerlaufen des Gerinnes kommt (Heberwirkung), wurde diesem unerwünschten Effekt mit einem „Schnorchel“ entgegengewirkt: Bei einem Pumpenstopp fällt das Wasser ab, es wird Luft eingezipen, die Flüssigkeitssäule reißt ab und das Gerinne bleibt ausreichend gefüllt.

Form und Abmessungen der Gerinne resultieren aus einem Versuchsaufbau. Im Probebetrieb wurden u.a. verschiedene Neigungswinkel getestet. Außerdem wurde darauf geachtet, dass günstige Strömungsgeschwindigkeiten eingehalten werden um gute Messbedingungen zu ermöglichen und zugleich Ablagerungen zu minimieren.

Verschiedene Einrichtungen für einen sicheren Betrieb der Messgerinne wurden installiert. Die Gerinne selbst stehen in einer Edelstahlwanne von der ein Abfluss durch den Containerboden führt. Kondenswasser oder Spritzer verteilen sich somit nicht im Container, sondern werden aufgefangen und abgeleitet. In der Wanne befindet sich ein Feuchtigkeitssensor, der im Fehlerfall anspricht und über eine Logik die zuführenden Pumpen ausschaltet und eine Störmeldung auslöst. Damit es gar nicht erst dazu kommt, ist als zusätzlicher Schutz eine Überfüllsicherung vorgeschaltet. An jedem einzelnen Gerinne überwachen Näherungssensoren ein unerwünschtes Überschreiten des maximal zulässigen Füllstandes. Strömungswächter erkennen, wenn es eine Unterbrechung in der Zuleitung gibt. Wird bei laufender Pumpe das Gerinne nicht durchströmt, so besteht ein kritischer Betriebszustand (z.B. Schlauchschelle am Gerinne hat sich gelöst: Abwasser ergießt sich ins Containerinnere) und es kommt zur Abschaltung der Pumpe.



Abbildung 23a+b: Näherungssensor (links) und Strömungswächter (rechts)

### 5.1.2 Probenahme-Einrichtung

Zum Einsatz kommt ein Kombiprobenehmer für zwei Messstellen „Ablauf“ und „Entlastung“. Die Proben werden automatisch mittels eines Vakuum-Systems aus dem jeweiligen Gerinne angesaugt und über Dosiergefäße nacheinander in eine von 24 Kunststoffflaschen eingefüllt. Die untere Darstellung zeigt einen Einschub mit Flaschen (links) und die beiden Programmierereinheiten mit Display und Eingabefeld (rechts). Ganz rechts sind die Dosiergefäße aus Glas dargestellt.



Abbildung 24a+b: Probenahme-Einrichtung

Es lassen sich folgende Probenahmearten einstellen:

- Zeitproportional
- Mengenproportional
- Durchflussproportional
- Ereignisproportional

Im Projekt wird zur Beprobung der Entlastungen ein Programm für 24 zeitproportionale Mischproben eingestellt. Die kürzeste Entnahmedauer von 5 Minuten je Flasche ermöglicht eine gute Darstellung der Messwerte und deren Entwicklung über den Entlastungsbeginn (Peak) hinaus. Es werden alle Flaschen ohne Unterbrechung nacheinander aufgefüllt. Die befüllten Flaschen verbleiben zunächst - zur Stabilisierung auf ca. 2°C heruntergekühlt - in der angeschlossenen Kühleinheit. Von dort werden sie zeitnah von Mitarbeitern zum Zentrallabor des Aggerverbandes transportiert und bis zur Analyse tiefgefroren eingelagert.

In der Praxis funktioniert die Beprobung der Entlastung meist reibungslos. Bei Proben aus dem mit deutlich mehr Feststoffen belasteten Ablaufgerinne, z.B. mit dem Ziel „Trockenwetter-Tagesgänge“ zu erstellen, kommt es trotz der „Freiblasfunktion“ vor dem Ansaugen des Mediums mitunter zu Schwierigkeiten durch verstopfte Schlauchleitungen. In einem solchen Fall wird die betroffene Leitung gereinigt, die Probenahme verworfen und eine erneute Beprobung angestoßen.

### 5.1.3 Schaltschrank und SPS-Display /-Eingabefeld

In jedem Messcontainer befindet sich ein Schaltschrank mit den wichtigsten Bedienelementen wie Signalleuchten, Taster, Schalter, SPS-Display und dem Eingabefeld MMI (**M**ensch-**M**aschine-Interface oder Möller MI4 genannt).

Die Leuchten signalisieren verschiedene Betriebszustände und über einen Taster können Störungen quittiert werden. Das Display zeigt wahlweise aktuelle Messwerte vom RÜB (z.B. Füllstand, Drosselwassermenge) oder vom Container (z.B. Messwerte der Onlinemessungen). Es können detaillierte Störmeldungen in Textform angesehen und die Spülintervalle für die Messgerinne programmiert werden.



Abbildung 25: Schaltschrank



Abbildung 26: MI4-Eingabefeld

## 5.2 Laboranalytik

Die Laboranalytik wird durch das nach DIN EN 17025 akkreditierte Zentrallabor des Aggerverbandes durchgeführt. Die Analysen werden bei Messprogrammen im Einzelnen nach den folgenden DIN-Verfahren bzw. Feldmethoden durchgeführt:

Tabelle 1: Verfahren Labor-Analytik

Parameter	Referenzverfahren	Teilweise alternativ verwendetes Verfahren
pH-Wert, Abwasser	DIN 38404 C 5	DIN 38404 C 5, Feldmethoden
Leitfähigkeit	DIN EN 27888 C 8	DIN EN 27888 C 8, Feldmethoden
TOC / CSB	DIN EN 1484 H 3 / DIN 38409 H 41	LCK 514, LCK 314 / Nanocolor CSB 160/1500
Nges geb. - TNb	DIN EN 12260 H 34	LCK 338, LCK 238, Nanocolor
NH <sub>4</sub> -N	DIN 38406 E 5	LCK 305, Nanocolor
NO <sub>3</sub> -N	DIN EN ISO 13395 D 28	LCK 339, LCK 340, Nanocolor
NO <sub>2</sub> -N	DIN EN ISO 13395 D 28	Nanocolor

<b>Pgesamt</b>	DIN EN ISO 11885 E 22	LCK 348, LCK 350, Nanocolor
<b>Abwassertemperatur</b>	DIN 38404 C 4	DIN 38404 C 4, Feldmethoden
<b>Schlammvolumenanteil</b>	DIN 38414 S 10	DIN 38414 S 10
<b>Schlamm Trockensubstanz</b>	DIN 38414 S 2	DIN 38414 S 2

### 5.3 Online Messtechnik<sup>9</sup>

In situ Online-Messsysteme kommen ohne wartungsintensive Probenvorbereitungseinheiten aus [BONGARDS ET AL. 2004<sup>10</sup>]. Bei in situ Messungen werden die Messdaten direkt im Abwasserbecken gewonnen. Damit stellen in situ Messungen eine wichtige Grundlage für einen permanenten Regel- und Steuerbetrieb einer Abwasserbehandlungsanlage dar.

Bereits im Vorfeld zu den Messungen im Kanalnetz wurde mit ausführlichen praktischen Untersuchungen bzgl. neuer Messtechniken und Messmethoden in einem Belebungsbecken (Abbildung 27) einer Kläranlage begonnen.

Dabei wurden online in situ Ammoniumstickstoff-Messgeräte sowie UV/UV-VIS<sup>11</sup> Spektrometer (für CSB und Nitrat) von verschiedenen Herstellern auf einer Kläranlage des Aggerverbands auf Praxistauglichkeit und Messsicherheit unter realen Bedingun-



Abbildung 27: Messsysteme im Test in einem Belebungsbecken



Abbildung 28: Messkopf eines ISE Systems

gen geprüft. Zuerst wurde ein Dauereinsatz im Belebungsbecken (ein Jahr) und dann, mit daraus ausgewählten Systemen, der Einsatz im Zulauf der Kläranlage getestet; damit konnten wichtige Erkenntnisse für die Auswahl von Messungen im Kanalsystem im KANNST Projekt gewonnen werden.

Bei den in situ Ammoniumstickstoff Geräten handelte es sich vor allem um ionenselektive (ISE) Membran-Systeme (Abbildung 28). Diese ISE und UV/UV-VIS-Systeme sind sehr wartungsarm, wenn sie im Belebungsbecken einer KA betrieben werden. Sie müssen nur in regelmäßigen Abständen von ca. 4-6 Wochen kalibriert werden. Eine automatische Druckluftereinheit an den Geräten reinigt die Messeinrich-

ft“, ISBN 9783863870096

<sup>10</sup> Bongards M., Hilmer T., Graner M. & Weber, M. (2004). Prozessoptimierung, Selbst lernende Reglersysteme; WWT Wasserwirtschaft Wassertechnik, Huss-Medien GmbH, Verlag Bauwesen; Berlin

<sup>11</sup> UV/UV-VIS Sonden erfassen alle im ultravioletten bzw. im ultravioletten und visuellen (sichtbaren) Lichtbereich absorbierenden Substanzen

tung, um somit einen Bewuchs der Messeinheit zu verhindern.

Weiterhin wurde ein kolorimetrisches System im Vergleichstest zu den ISE-Sonden für den Parameter Ammoniumstickstoff untersucht. Diese Messeinheit benötigt keine Luftdruck-Spülung. Der Abwasserstrom und eine Anti-Fouling-Beschichtung der dabei verwendeten Membran verhindern eine Verunreinigung.

### 5.3.1 Messverfahren für Ammoniumstickstoff

Ammoniumstickstoff ist ein im Abwasser vorkommender gelöster Stoff und kann insitu mit ionenselektiven oder kolorimetrischen Sonden erfasst werden.

#### Ionenselektive Sensoren (ISE)

Ionenselektive Sensoren bestehen aus einer ionenselektiven Elektrode (ISE), einer Referenzelektrode und einer hochohmigen (rauscharmen) Messelektronik. Die ISE und die Referenzelektrode befinden sich im selben Medium.

Die ionenselektive Membran besteht häufig aus Polyvinylchlorid (PVC) und ist wie ein Schwamm strukturiert. Diese Membran kann nur eine bestimmte Art (Größe) von Ionen durch Diffusionskräfte

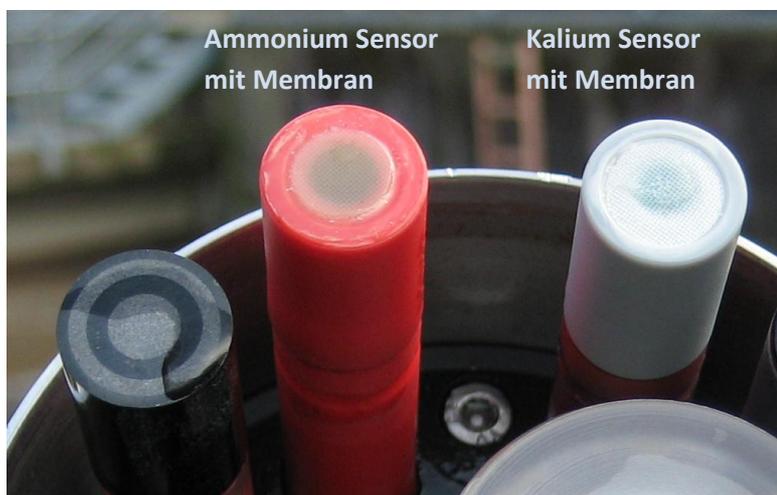


Abbildung 29: Messelektroden des ISE Sensors

transportieren, die abhängig vom Unterschied der Konzentrationen zwischen Innen- und Außenseite der Membran sind. Für Ionen anderer Stoffe, die größer sind, stellt die Membran eine unüberwindbare Barriere dar. In der Abbildung 29 ist die Membrane auf dem Messkopf zu erkennen, durch die Ionen des Ammoniumstickstoffs diffundieren.

Diese Art, den Ammoniumstickstoff-Gehalt im Wasser zu bestimmen, ist jedoch querempfindlich gegenüber Kalium. Da die Ionen von Kalium kleiner als die Ionen von Ammonium sind, können sie die Membran ungehindert passieren und fließen somit in das Messergebnis mit ein. Aus diesem Grund verfügt das ISE Gerät in Abbildung 29 neben einem Sensor für Ammonium auch über einen Sensor für Kalium. So kann über den Kalium-Messwert der Fehler der Ammoniumstickstoff-Messung korrigiert werden.

ISE Sonden erfordern in regelmäßigen Abständen die Reinigung und den Austausch der ionenselektiven Membran, da sie einem natürlichen Alterungsprozess unterliegt, wodurch das Material der Membran verschleißt.

#### Kolorimetrische Systeme

Ein kolorimetrisches System arbeitet nach dem Prinzip eines Photometers, in dem eine Probe mit Licht einer bestimmten Wellenlänge durchleuchtet wird. Dieses System wird ebenfalls insitu eingesetzt.

Der Unterschied zu einem Photometer besteht darin, dass dem Testmedium spezielle Reagenzien, direkt in der Messboje des kolorimetrischen Systems, beigefügt werden, die zu einer Färbung der Probe führen. Auf diese Weise kann der Gehalt von Ammoniumstickstoff gemessen werden, obwohl Ammoniumstickstoff normalerweise keine eindeutige Lichtabsorption aufweist. Im Gerät wird Licht mit einer spezifischen Wellenlänge für Ammonium durch die Lösung geschickt und auf der anderen Seite mit einer Photozelle detektiert.

Bei diesem Verfahren besteht keine Ammonium-Querempfindlichkeit zu anderen Ionen (z.B. Kalium  $K_+$ ) wie es bei den ISE Methoden der Fall ist. Nachteilig ist dagegen eine ca. 20 minütige Reaktionszeit des Mediums, bis der Messwert verfügbar ist. Aufgrund dieser Verzögerungszeit sind kolorimetrische Systeme für den Einsatz in einer permanenten und zeitkritischen Online-Regelung nicht geeignet.

### 5.3.2 Messverfahren für chemischen Sauerstoffbedarf

CSB kann mit einem Spektrometer gemessen werden. Das Gerät besteht aus drei Bauteilen: der Sendeeinheit, der gegenüberliegenden Empfangseinheit und der zwischen den beiden Einheiten befindlichen Messstrecke, in der sich die zu bemessende Probe befindet.

Es gehen zwei Lichtstrahlen von der Sendereinheit aus, einer zur Erfassung des zu messenden Mediums und ein zweiter Lichtstrahl zur Kompensation für einen internen Vergleich. Der erste Strahl wird durch den Messspalt zwischen Sender und Empfänger, also durch die Messstrecke geschickt. Der zweite Lichtstrahl wird zur automatischen Erkennung und Kompensation von Störungen eingesetzt.



Abbildung 30: Messspalt einer CSB Sonde

Ein optisches System fokussiert Mess- und Kompensations-Lichtstrahl und leitet beide auf einen Strahlenselektor (Prisma), der das Licht in seine Spektralfarben aufteilt. Es folgt ein Sensor, der das Spektrum über 256 feststehende Photodioden empfängt. Mit dieser Methode kann das komplette Spektrum von 200 bis 750 Nanometer (nm), d.h. UV Strahlung und sichtbarer Strahlung (VIS), aufgenommen werden. Je nach Art und Anteil der organischen Verbindungen (CSB) in der Probe werden bestimmte Wellenbereiche des Lichts unterschiedlich absorbiert. So können in einem System die Konzentrationen mehrerer Abwasserinhaltsstoffe gleichzeitig erfasst werden, wenn die Spektren getrennt voneinander zu erkennen sind.

Der Parameter CSB liegt dabei im UV Bereich ungefähr zwischen 250 und 380 nm. Nitrat ist bei einer Wellenlänge von 200 bis ca. 250 nm getrennt erkennbar. Die Anpassung an das zu messende Medium erfordert in der Praxis unter Umständen erheblichen Kalibrieraufwand [BONGARDS ET AL. 05/2005<sup>12</sup>], die Wartung fällt jedoch gegenüber ISE Sonden geringer aus, da die optische Messeinheit im Gegensatz zu den Membranen von ionenselektiven Geräten verschleißfrei arbeitet.

<sup>12</sup> Bongards M., Hilmer T. & Graner M. (05/2005). Online-Prozessspektrometer; WWT Wasserwirtschaft Wassertechnik, Huss-Medien GmbH, Verlag Bauwesen, Berlin

Neben der Funktionsfähigkeit der Sensoren sind die Kosten der getesteten Messgeräte ein wichtiger Faktor für einen wirtschaftlichen Betrieb. Die Anschaffungs- und Betriebskosten der Systeme sind sehr unterschiedlich.

Die ISE Geräte sind zwar niedriger im Anschaffungspreis, haben jedoch einen höheren Kostenaufwand bei der Wartung und Betreuung. Die Investitionskosten der photometrischen sowie Spektralanalyse Sensoren sind hingegen drei bis vier Mal höher als bei ISE Geräten, wohingegen die Betriebskosten jedoch aufgrund minimalen Wartungsaufwands sehr gering ausfallen. Die Jahreskosten (bezogen auf fünf Jahre Nutzungsdauer inkl. Abschreibung) für ISE Geräte liegt bei ca. 1.700 Euro und für Spektrometer und Photometrische Sensoren bei ca. 3.500 Euro.

Generell ist jedoch zu sagen, dass die Investitions- und Betriebskosten immer im Verhältnis zu den mit den Geräten gewonnen Informationen stehen, die einen sicheren und kontrollierten Betrieb ermöglichen. Allerdings sind die Kosten, verursacht durch den Personalaufwand für Reinigung und Wartung, nicht zu vernachlässigen. Dieser Aufwand wurde jedoch in die oben zitierte Betrachtung der Betriebskosten nicht mit einbezogen, da die Wartungszeiten stark von dem Verschmutzungsgrad des zu messenden Mediums und von der Einbausituation (Nennweite des Kanals, Bypassmessung, Messung auf Ponton) abhängen.

### 5.3.3 Arbeitsaufwand Wartung

Um den Betrieb der Kanalnetzsteuerung zu gewährleisten, sind regelmäßige Reinigungs- und Wartungstätigkeiten durchzuführen. In diesem Abschnitt wird dargestellt, welcher Aufwand in den einzelnen Projektphasen bei den verschiedenen Teilaufgaben entstanden ist.

Diese regelmäßigen Tätigkeiten lassen sich diesen Bereichen zuordnen:

- Kontrolle und Störungsbeseitigung
- Sondenreinigung
- Kalibrierung
- Sonstiges (z.B. Wartung Kompressoren)

#### ***Kontrolle und Störungsbeseitigung***

---

In allen Phasen des Projektes überwacht ein Mitarbeiter arbeitstäglich in der Prozessdatenverarbeitung, ob Störungen den Betrieb beeinträchtigen. Dazu gehört auch eine Plausibilitätskontrolle der Messwertverläufe. Es wird darauf geachtet, dass die Messwerte in sinnvollen Bereichen verlaufen und deren Dynamik plausibel erscheint (z.B. ob übliche Tagesgänge erkennbar sind).

Grundsätzlich sind viele unterschiedliche Fehlerarten denkbar und im Projekt auch tatsächlich aufgetreten. In manchen Fällen kann eine Störungsursache nicht durch Blick in das Prozessdatenverarbeitungssystem bestimmt werden. In diesen Fällen muss der Mitarbeiter vor Ort Fehlersuche betreiben. Ist die Ursache festgestellt, wird sie entweder sofort behoben oder als Auftrag an die zuständige Abteilung der Instandhaltung weitergeleitet.

## Sondenreinigung

In der Regel erfolgt eine automatische, zyklische Reinigung durch Druckluft. Der Ammonium Sensor ist dazu mit einem speziellen Reinigungskopf ausgestattet. Die Membranen werden alle 30 Minuten mit Druckluft frei gespült. Dieses Intervall hat sich nach verschiedenen Tests als geeignet erwiesen.



Abbildung 31: Sensorkopf mit aufgesetzter Luftspülung

Um einwandfreie Messwerte zu erzielen, müssen die Sonden in den Messgerinnen zusätzlich etwa zweimal wöchentlich gereinigt werden. Dies gilt insbesondere für die Messgerinne welche mit Abwasser aus dem Kanal beschickt werden. Messungen direkt im Kanal, also ohne Messgerinne als Vorlage, müssen noch öfter gesäubert werden. Die Messung im Zulauf "Nümbrecht" der Kläranlage Homburg-Bröl erfordert eine tägliche Reinigung. Ähnlich verhält es sich bei der Messung am RÜB Kalkofen, an dem eine automatische Reinigungseinrichtung getestet wird.

Eine typische Sondenreinigung läuft folgendermaßen ab:

- Rechengut grob entfernen
- Schlamm und Fett mit Spülmittel lösen
- Ionenselektive Membranen mittels destilliertem Wasser und weicher Bürste von Anhaftungen befreien
- Optischen Messpfad der CSB-Sonde mit Wasser und Spülmittel von Fettablagerungen reinigen.



Abbildung 32: Mess-Spalt des Spektrometers nach dem Einsatz im Kanal

## ***Kalibrierung***

---

Die Onlinemessungen müssen in regelmäßigen Abständen kalibriert werden. Günstig für die Reinigung ist ein Messgerinne, da die Messgeräte dabei frei zugänglich sind. Problematisch ist dagegen die Wartung bei Geräten, die im Kanal eingebaut sind.

Besonders wichtig für gute Messergebnisse ist die regelmäßige Kalibrierung der Messgeräte. Bei der ionenselektiven Messung wird zwischen zwei Verfahren unterschieden:

- Die Offsetkalibrierung gegen Labormessungen

Bei diesem Verfahren wird eine Probe des Abwassers im Labor ausgewertet und mit dem Ergebnis der Messwert korrigiert.

Dieses Kalibrierverfahren wird zu Beginn des Projekts mindestens alle zwei Wochen durchgeführt, zudem immer, wenn die Messwerte unrealistisch hoch oder niedrig wirken. Ab Juli 2006 wird das Intervall auf einmal pro Woche verkürzt.

- Die Mehrpunktkalibrierung gegen Standardflüssigkeiten

Bei diesem Verfahren wird das Messgerät über zwei Standardflüssigkeiten mit verschiedenen Konzentrationen eingestellt. Es wird die so genannte Elektrodensteilheit bestimmt. Diese gibt eine klare Aussage über den Zustand des Messkreises (Membranen und Referenzelektrode).

Dieses Verfahren wird Anfang 2006 monatlich durchgeführt. Ab August 2006 wird das Verfahren nur noch durchgeführt um den Zustand der Messungen zu überprüfen.

## ***Sonstiges (z.B. Wartung Kompressoren)***

---

Weitere Tätigkeiten im Zusammenhang mit den Onlinemessungen sind:

- Regelmäßiges Entwässern der Kompressoren für die Druckluftreinigung
- Reinigung der Container, insbesondere der Messgerinne
- Probenehmer-Programmstart für das nächste Ereignis

### **5.3.4 Automatische Reinigungseinrichtung**

Die Besonderheit am RÜB Kalkofen ist die Onlinemessung im Kanal. Dies ist bedingt durch die fehlende Pumpenvorlage (ungedükertes IDM). Um den Personalaufwand bei dieser verschmutzungsanfälligen Messstelle zu optimieren, wird eine automatische Reinigungseinrichtung für die NH<sub>4</sub>-N-Messung im Kanal getestet.

Beim RÜB Kalkofen hängt die NH<sub>4</sub>-N-Sonde senkrecht am unteren Ende eines langen Kunststoffrohrs im Kanal (s. Abbildung 35). Da sich der Sensor kurz über der Sohle befindet - um auch bei niedrigen Wasserständen ausreichend mit Medium benetzt zu werden - sammelt sich hier vermehrt Rechengut an.

Um den manuellen Reinigungsaufwand zu minimieren wird eine geeignete Apparatur installiert. Der untere Teil des langen Kunststoffrohrs an dem die Sonde befestigt ist, hat ein Gelenk. Somit ist die NH<sub>4</sub>-N-Messeinrichtung klappbar aufgehängt und kann bei zunehmender Verlegung in Fließrichtung auslenken (s. Abbildung 36). Dadurch löst sich schon ein Teil der anhängenden Feststoffe. Sehr große Auslenkungen mit entsprechendem Behang stellen ein Problem dar. Im ungünstigsten Fall werden die Membranen aus dem Medium gehoben.

Zur weiteren Unterstützung des Reinigungsablaufes ist die Konstruktion an einem Seilhebezug aufgehängt. Der Heber-Motor ist an einen Ausleger mit Regenschutz montiert (s. Abbildungen 33 und 34) und wird von der SPS im Messcontainer gesteuert. Sonde und Rohr sind über Schlitten und Führungsschiene vertikal beweglich.

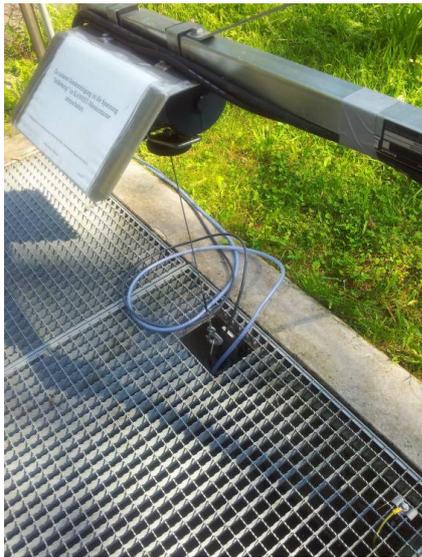


Abbildung 33: Automatische Sondenreinigung am RÜB Kalkofen

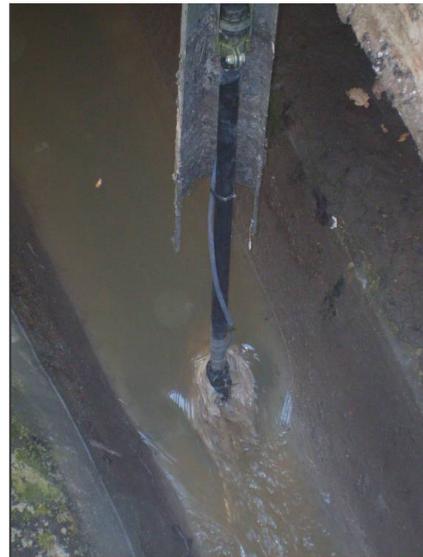


Abbildung 34: Belegte Ammoniumsonde im Kanal

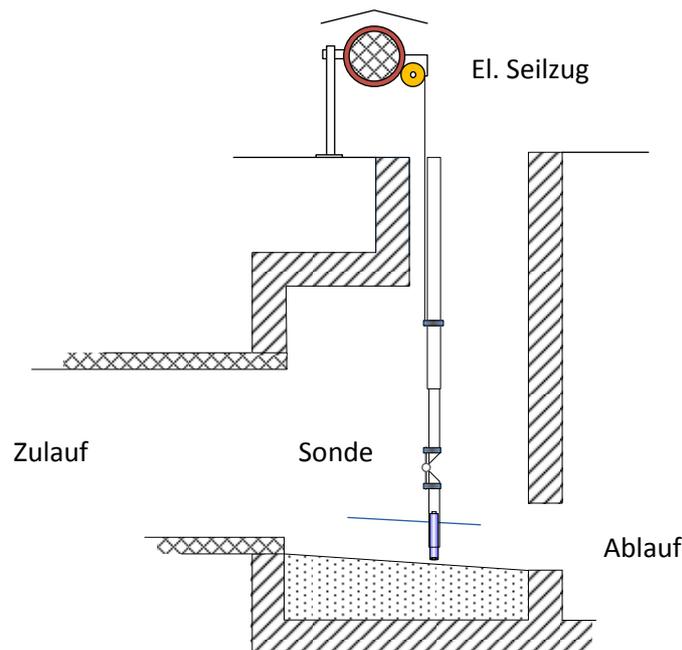


Abbildung 35: Skizze der Apparatur zur Sondenreinigung

In bestimmten Zeitintervallen wird das Rohr mit der Sonde um ca. 30 cm angehoben. Dadurch klappt die Apparatur zurück, der Behang löst sich und fließt mit der Strömung ab. Danach wird die Sonde wieder abgesenkt und hängt dann senkrecht ohne Auslenkung im Abwasser. Es hat sich bewährt den Vorgang alle vier Stunden zu wiederholen. Damit wird auch verhindert, dass die Membran aus dem Medium gehoben wird.

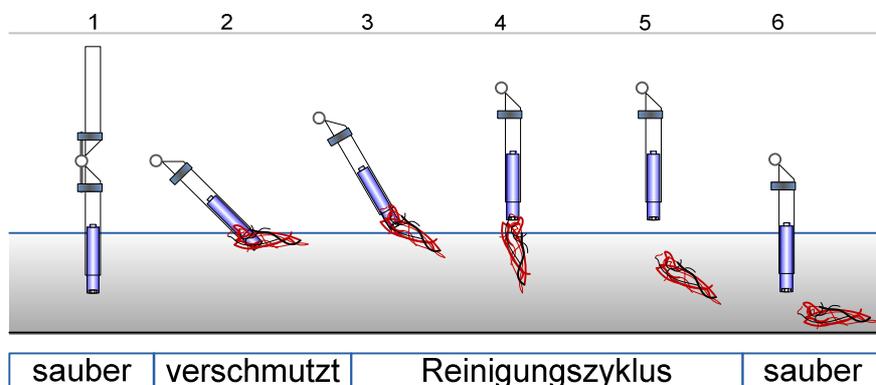


Abbildung 36: Schema Reinigungszyklus

Wie die unten stehenden Messwertverläufe in Abbildung 37 und 38 zeigen, wird die Messwertqualität durch den Betrieb der automatischen Reinigung verbessert. Ohne Reinigung befindet sich der Sensor aufgrund von Verschmutzung des Öffneren nicht mehr im Messmedium. Es ist keine sinnvolle Messung mehr möglich, wenn sich das untere Ende des Sensors aufgrund von starker Belegung im Bereich des Wasserspiegels befindet. Zu erkennen ist dieser Umstand in Abbildung 37 an einem Absinken der Messwerte auf nahezu Null bzw. an Verläufen mit geringer Dynamik. Gerade bei Trockenwetter und in den Nachtstunden mit geringen Durchflussmengen tritt das beschriebene Problem verstärkt auf.

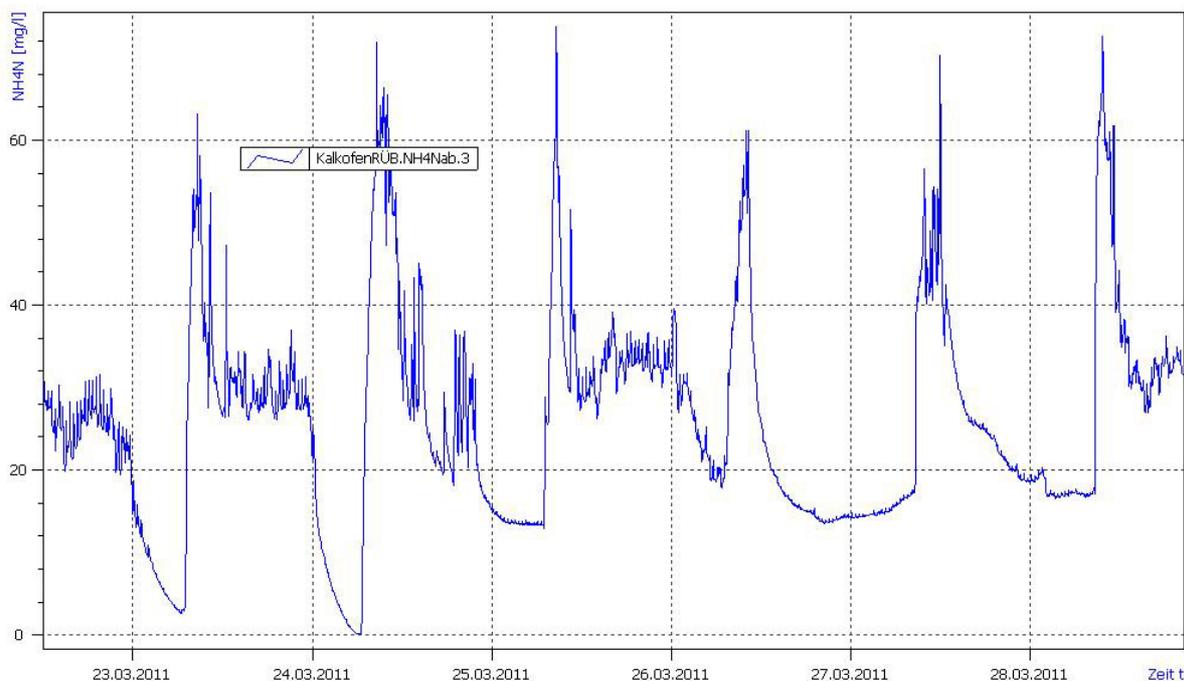


Abbildung 37: Messung NH<sub>4</sub>-N Kalkofen, ohne Reinigungseinrichtung

Zum Vergleich ist in Abbildung 38 ein einwandfreier Verlauf mit typischen Tagesgängen ohne träge unplausible Bereiche zu sehen.

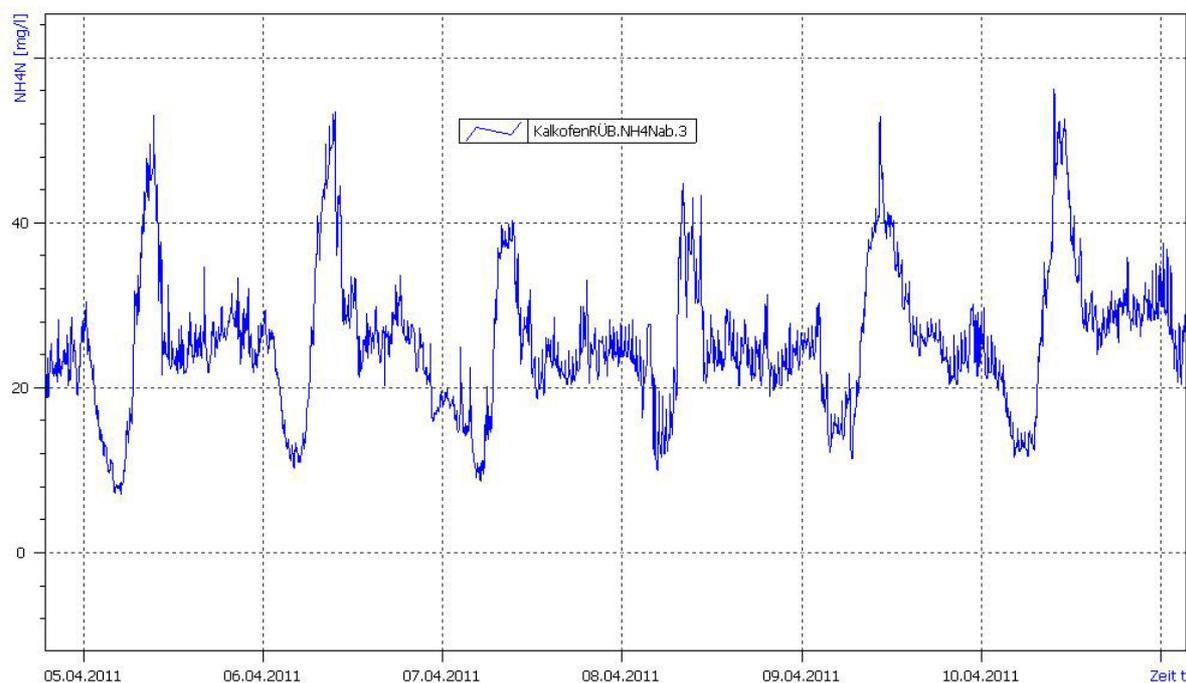


Abbildung 38: Messung NH<sub>4</sub>-N Kalkofen, mit Reinigungseinrichtung

### 5.3.5 Ergebnisse der Messtechnik im Kanalsystem<sup>13</sup>

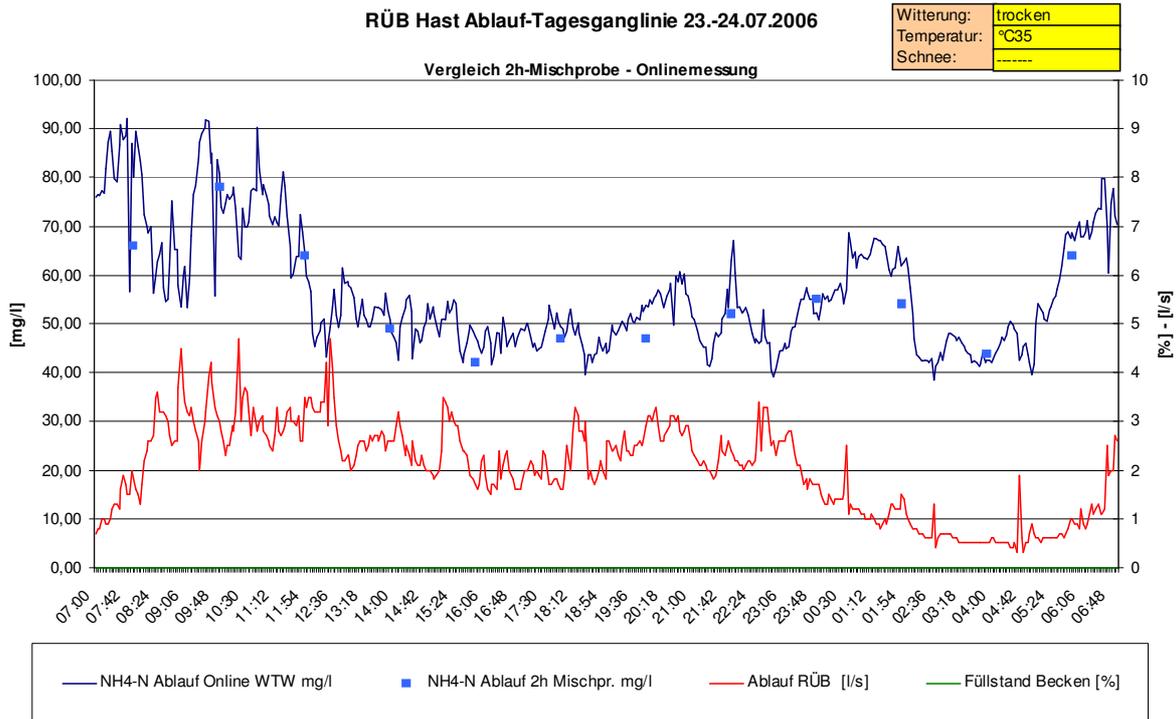
In diesem Abschnitt werden einige Ergebnisse aus dem im Einsatz im Kanalsystem gezeigt.

#### Ammoniumstickstoff-Messung

Im Gerinne der Messcontainer an den RÜB werden im 3-Minuten Takt die Parameter Ammoniumstickstoff (NH<sub>4</sub>-N), Temperatur, pH-Wert und CSB im Bypass gemessen. Im restlichen System werden Füllstände, Durchflussmengen und Entlastungsmengen aufgenommen.

In Abbildung 39 sind als Beispiel die Messgrößen NH<sub>4</sub>-N und der hydraulische Durchfluss bei einer trockenen Wetterlage dargestellt. Das RÜB ist zu diesem Zeitpunkt leer. Die Messung erfolgt im Mischwasser. Die Messgenauigkeit der NH<sub>4</sub>-N online Werte (blaue Linie) wird durch die im Labor ermittelten zwei Stunden NH<sub>4</sub>-N Referenz-Mischproben (blaue Kästchen) bestätigt.

<sup>13</sup> Quelle: Haag, T.: „Wasser in der Gesellschaft“



**Abbildung 39: Messwerte aufgenommen am RÜB Hast**

Insgesamt werden drei ISE-Geräte von verschiedenen Herstellern getestet. In Abbildung 40 sind die Messergebnisse im Vergleich aufgetragen (Auswertung und Messdaten befinden sich im Anhang 03). Als Referenz dienen wie in Abbildung 39 Küvetten-Tests.

Die ISE-Geräte zeigen leicht unterschiedliches Verhalten. Besonders plausibel, wie auch in der Grafik zu erkennen, gab die ISE-Sonde „Sensor 2“ den Verlauf des Parameters  $\text{NH}_4\text{-N}$  wieder. Sie überzeugte zudem durch eine einfache Handhabung sowie einen geringen Wartungsaufwand gegenüber den beiden anderen Geräten.

## Ammoniumstickstoff

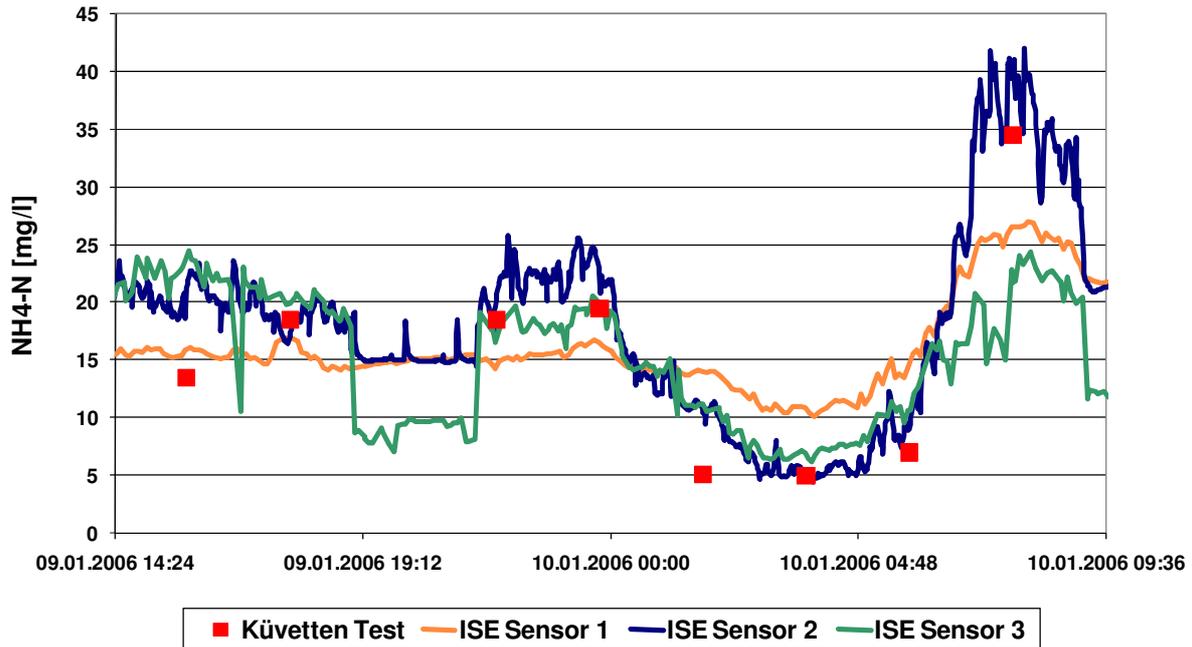


Abbildung 40: Messergebnisse Ammoniumstickstoff am Ablauf RÜB Talstraße

Der „Sensor 1“ ist zu stark gedämpft. Veränderungen werden zwar erkannt, aber nicht umfänglich wiedergegeben. Der „Sensor 3“ zeigt immer wieder Messwert-Sprünge, wie in der Grafik am 09.01. gegen 19.00 Uhr deutlich zu erkennen ist.

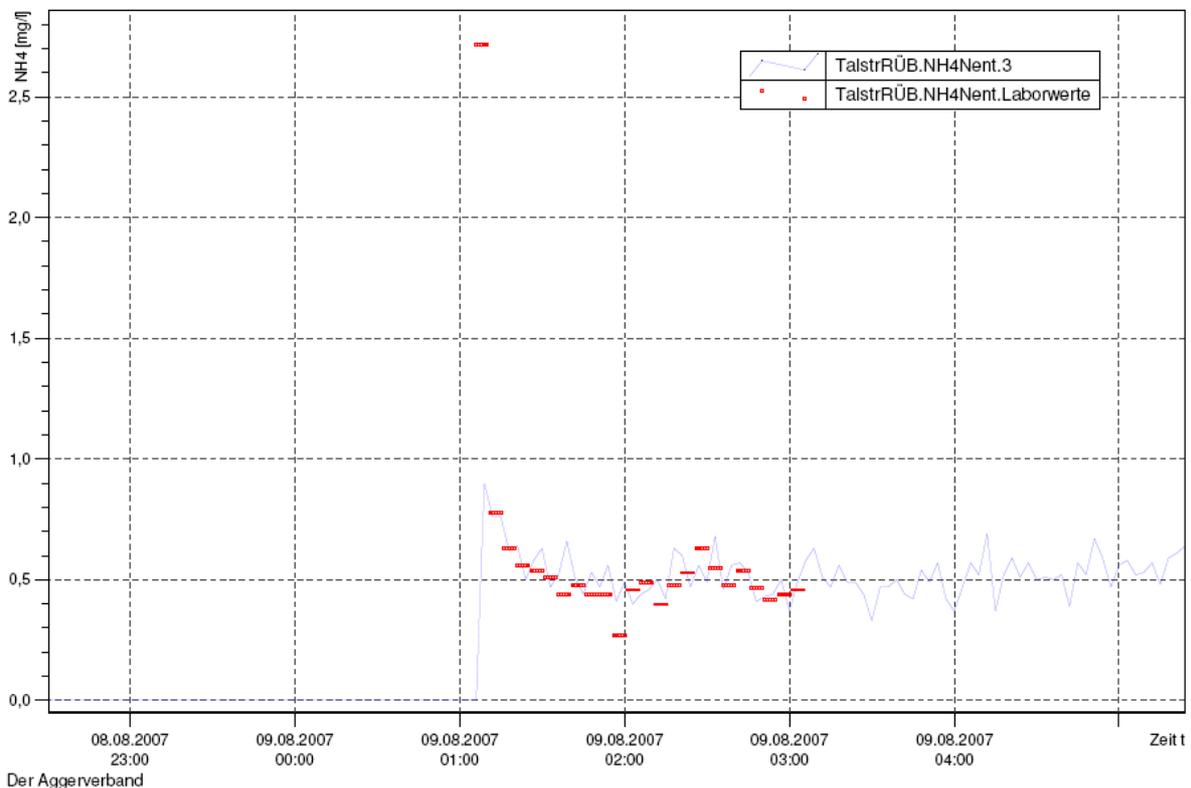
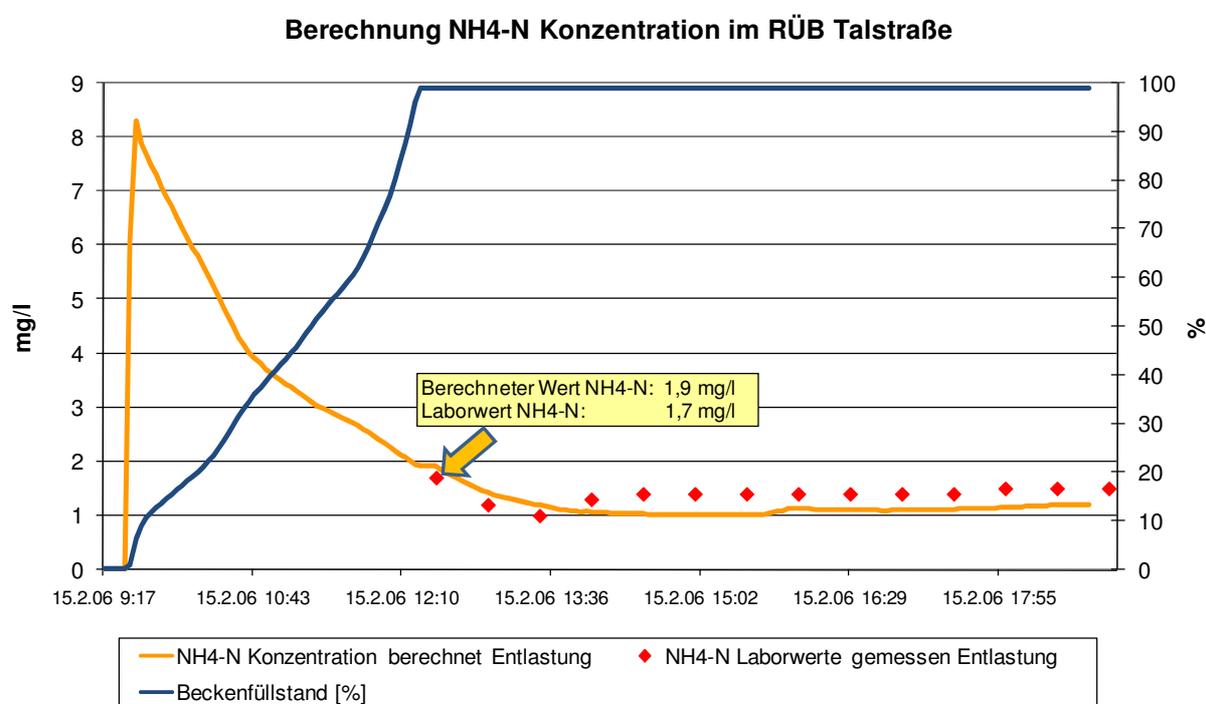


Abbildung 41: Ammoniumstickstoff in der Entlastung

Sensor 2 konnte sich in einer 1-jährigen Testphase von den anderen Geräten positiv absetzen und im praktischen Einsatz im Abwasser-Messcontainer überzeugen.

Die Ergebnisse aus Abbildung 39 und Abbildung 40 beziehen sich auf die Durchflussmessung am Regenüberlaufbecken im „Gerinne 1“. Das zweite Gerinne im Container wird, wie bereits beschrieben, für die Messung einer Entlastung am RÜB eingesetzt.

Es hat sich gezeigt, dass die Konzentrationen des Ammoniumstickstoffs bei einer Messung in der Entlastung meist unter 1 mg/l liegen, wie in Abbildung 41 zu erkennen ist. Das Erfassen von so geringen Messwerten ist eine Herausforderung für die Messgeräte, da bereits kleine Konzentrationsunterschiede (zwischen Online-Messung und einer Referenzmessung) eine große prozentuale Abweichung darstellen können. Aufgrund der nicht immer zufriedenstellenden Ergebnisse der Messungen in der Entlastung werden Untersuchungen durchgeführt, um herauszufinden ob die Messung durch eine Berechnung der Werte ersetzt werden kann. Aus der permanenten Messung NH<sub>4</sub>-N im Gerinne 1 kann die Konzentration im Becken berechnet werden.



**Abbildung 42: Berechnung der NH<sub>4</sub>-N Konzentration in der Entlastung**

Da Ammoniumstickstoff gelöst vorliegt und das Becken bei einer Befüllung bzw. Entlastung durchmischt ist, liegen gleichmäßige NH<sub>4</sub>-N-Konzentrationen vor. Auf dieser Grundlage kann über eine Stoff-Bilanzierung die NH<sub>4</sub>-N-Konzentration in der Entlastung berechnet werden. Dies wird auch in einer Untersuchung am RÜB Talstraße nachgewiesen. Das bedeutet, die Onlinemessung des Ammoniumstickstoffs im Gerinne 2, ist nicht zwingend erforderlich und kann durch eine Berechnung ersetzt werden!

Beispielhaft werden einige Ereignisse berechnet (siehe Anhang 04) und in der Abbildung 42 auszugsweise dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass die vom Labor bestimmten Werte für NH<sub>4</sub>-N in der Entlastung (rot) gut mit den errechneten Konzentrationen (orange) übereinstimmen.

### CSB-Messungen

CSB Daten sind ein Maß für die Belastung des Abwassers und die Grundlage für eine Simulation von Kläranlage und Kanalnetz. Sie ermöglichen die Anpassung der Simulation an das Kanalnetz. Eine realitätsnahe, frachtbezogene Simulation ist ohne Berücksichtigung des CSB-Messwerts nicht möglich.

Eine UV/UV-VIS-Sonde wurde im Gerinne 1 für den Parameter CSB eingesetzt und getestet. Das Spektrometer-Gerät liefert ebenfalls praxistaugliche Ergebnisse (Abbildung 43). Zur Kontrolle der Online-Messdaten werden wieder Labor-Küvetten-Tests herangezogen.

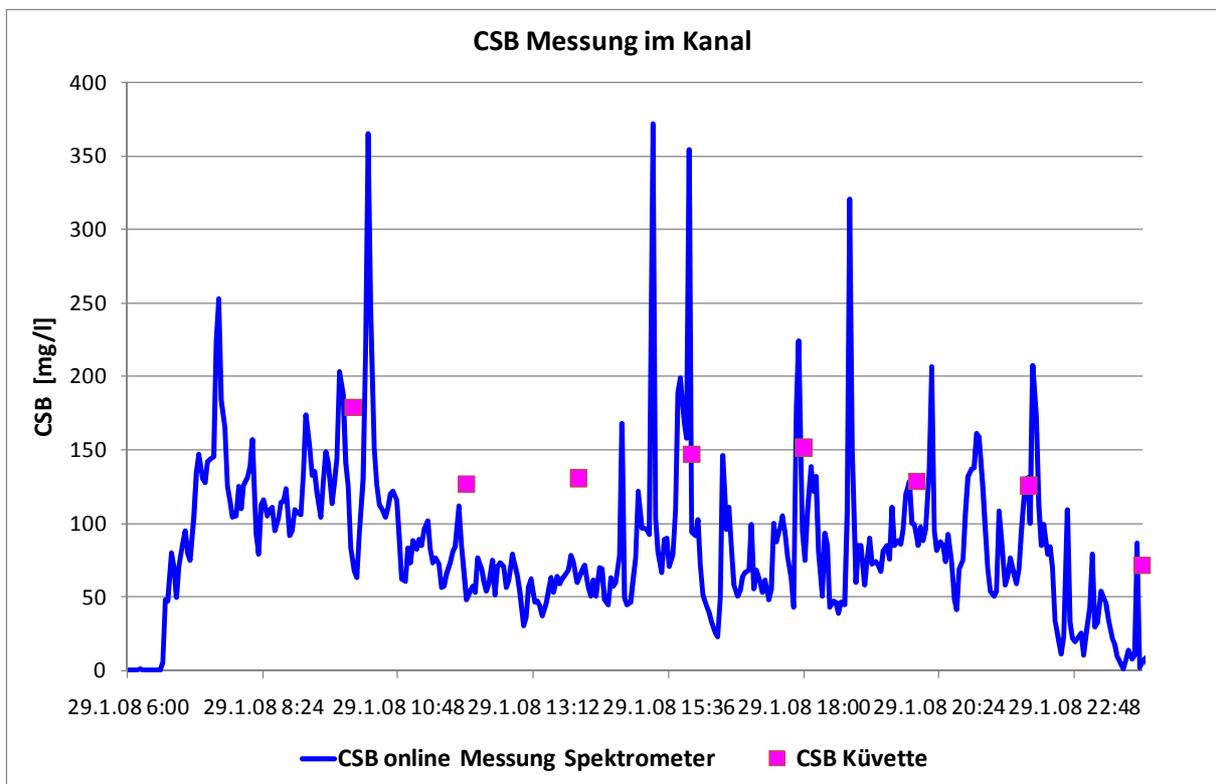


Abbildung 43: CSB Werte im Kanal, Ablauf des RÜB

Die Online-Messungen von CSB und Ammoniumstickstoff im Gerinne 1 und als Bypass-Methode haben ihre Praxistauglichkeit in einer fast 13 Monate andauernden Testphase bewiesen.

## 5.4 Messtechnik Niederschlag

Niederschlagsereignisse bestimmen durch ihr dynamisches Verhalten die Schmutzbelastung des Kanalnetzes. So bringt starker Regen nach einer Trockenzeit einen Belastungsstoß in den Kanal, wohingegen ein Regenereignis mit gleicher Intensität bei häufigen, hintereinander auftretenden Niederschlägen, nur eine geringe Schmutzbelastung verursacht. So spült der Regen nach einer längeren Trockenzeit die angesammelten Schmutzstoffe von z.B. Straßen, befestigten Flächen und Hausdächern ins Kanalnetz. Ablagerungen können der Kläranlage stoßweise zugeführt werden.

Im Rahmen der Entwicklung einer integrierten Steuer- und Regelungsstrategie für Kläranlage und Kanalnetz ist eine möglichst genaue Vorhersage des gesamten Abwasseraufkommens, inklusive Regenwasser, erforderlich. Dafür ist es notwendig, Regenereignisse in ihrer Dynamik und Menge zu erfassen und zu bewerten.

Da Wasser aus Niederschlägen häufig unterschiedlich starke Auswirkungen auf das Einzugsgebiet am Kanalnetz hat, wurde zunächst punktuell das Niederschlagsverhalten in der Region Homburg-Bröl aufgenommen. Die Untersuchungen dienen dazu, verschiedene Messverfahren für die Online-Niederschlagsmessung zu testen und sie im Hinblick auf eine mögliche Einbindung in eine vorausschauende Regelung zu analysieren.

### 5.4.1 Aufbau des Niederschlag-Messfelds

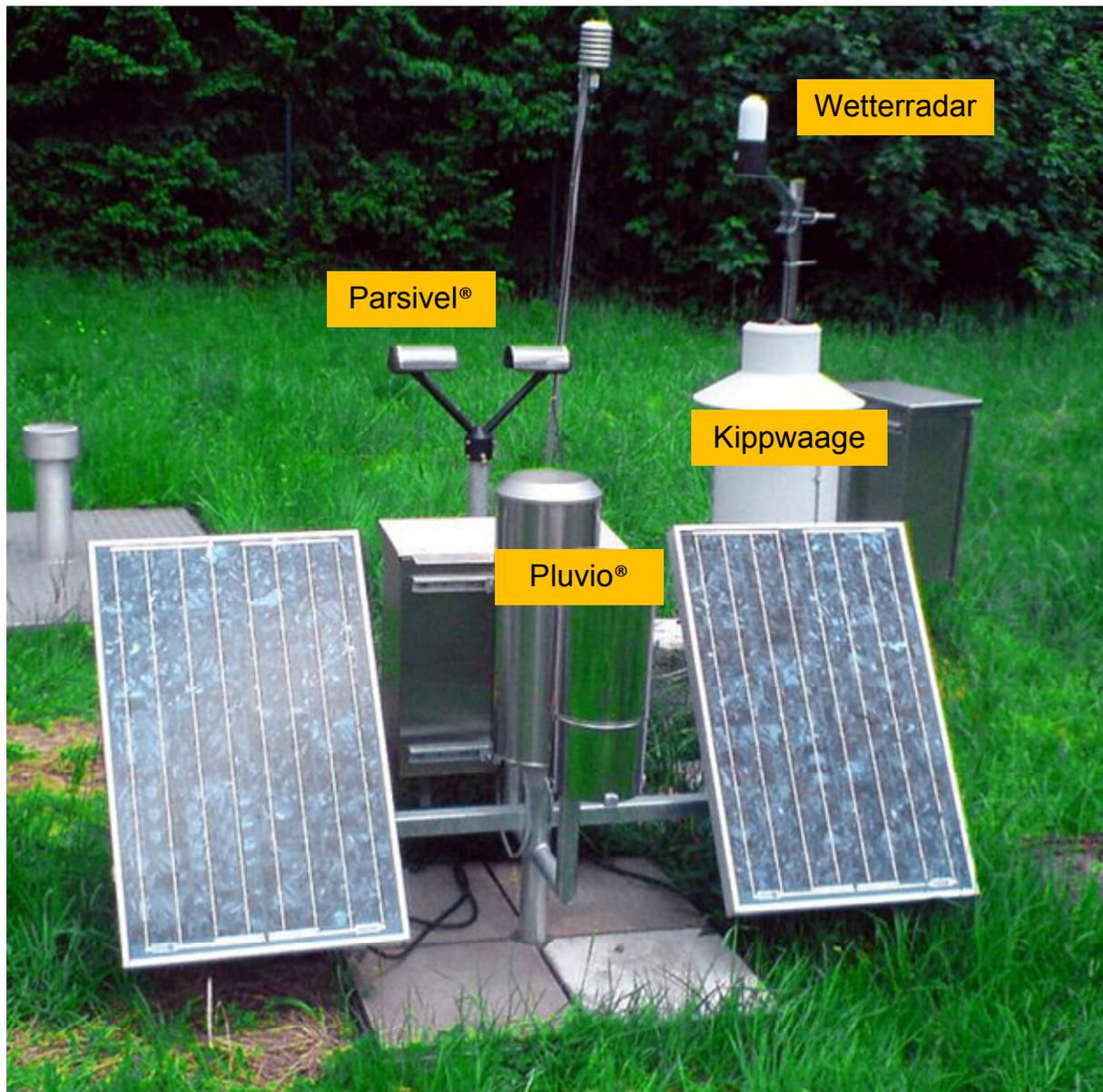
Für die Erfassung des Niederschlags wird ein Test-Messfeld mit verschiedenen Gerätetypen für eine vergleichende Auswertung auf dem Gelände am RÜB Talstraße aufgebaut. Die Messtechniken der unterschiedlichen Niederschlag-Erfassungs-Geräte werden hinsichtlich der Zuverlässigkeit und der individuellen Eignung für den späteren Einsatz in einer Abflusssteuerung untersucht.

Das Messfeld besteht aus:

- Radar der Firma Lufft (Erfassung Tropfengeschwindigkeit/-größe)
- Pluvio® der Firma Ott (Erfassung Gewichtszunahme in einem Sammelgefäß)
- Wippregenschüssel (Kippwaage)
- Parsivel® der Firma Ott (Laser-optisches Distrometer)

Alle Geräte entsprechen dem aktuellen Stand der Technik.

Niederschlagsereignisse müssen zeitnah erfasst und der Regelung des Kanalnetzes online zur Verfügung stehen. Die Eignung der Geräte wird für diesen Zweck geprüft. Die unterschiedlichen Niederschlag-Messgeräte werden am RÜB Talstraße im Einzugsgebiet der KA Homburg-Bröl installiert (Abbildung 44). Durch die Vereinheitlichung der Messbedingungen an einem gemeinsamen Ort sollen die Messfehler durch äußere Einflüsse minimiert werden. Später werden die geeigneten Geräte für eine gute Flächenabdeckung im Einzugsgebiet der KA Homburg-Bröl verteilt und aufgestellt. Die Niederschlagsereignisse werden mit allen Messgeräten parallel aufgezeichnet und vergleichend ausgewertet. Anschließend erfolgt die Gewichtung und Kategorisierung der Niederschlagsereignisse und ein Vergleich der Intensitäten. Wegen möglicher Schneefälle wird speziell die Eignung des Schicht-Radar-Messgeräts geprüft. Dieses kann unterschiedliche Niederschlagsarten erkennen (Schnee bzw. Regen), die sich in ihrem Niederschlag-Abfluss-Verhalten grundlegend unterscheiden.



**Abbildung 44: Gemeinsamer Aufstellungsort für identische Messbedingungen**

Als Niederschlag wird nach der DIN 4049 [1992] „aus der Lufthülle ausgeschiedenes Wasser mit den Hauptformen Regen und Schnee“ bezeichnet und kann eingeteilt werden in:

- |                    |                      |                             |
|--------------------|----------------------|-----------------------------|
| • Sprühregen:      | weniger als 1 mm/h   | -> weniger als 0,017 mm/min |
| • Schwacher Regen: | weniger als 2,5 mm/h | -> weniger als 0,043 mm/min |
| • Mäßiger Regen:   | 2,6 bis 7,5 mm/h     | -> 0,043 bis 0,125 mm/min   |
| • Starker Regen:   | mehr als 7,5 mm/h    | -> mehr als 0,125 mm/min    |

Die Multiplikation von Niederschlagsintensität und Niederschlagszeit ergibt die Niederschlagshöhe und kann als Maß für die Ergiebigkeit des Niederschlagsereignisses gesehen werden. Regenintensitäten über 0,5 mm/h führen bei entsprechender Dauer zu nennenswerten Niederschlagshöhen und sind somit zu erfassen.

## 5.4.2 Vorstellung der Messverfahren

Die Messverfahren werden vor der Auswertung der Vergleichsmessungen vorgestellt. Die **Kippwaage**

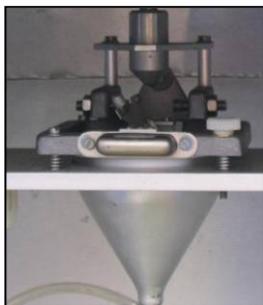


Abbildung 45: Kippwaage

(Abbildung 45) arbeitet als Impulzzähler. Dabei entspricht ein Impuls einer festen Niederschlagshöhe. Das im Versuchsaufbau verwendete Gerät arbeitet nach dem Kipplöffelprinzip und gehört zu den ältesten, aber robustesten Niederschlagsmessverfahren.

Die jeweils obere Schale des Kipplöffels, auch als Wippe bezeichnet, füllt sich über einen Trichter mit Wasser. Wenn sie ein definiertes Volumen aufgenommen hat, kippt sie nach unten und entleert sich. Jeder Entleerungsvorgang erzeugt einen Impuls, der von einem Datenlogger in seiner zeitlichen Abfolge erfasst und gespeichert wird. Jede Kippbewegung entspricht der Menge von 0,1 mm gefallenem Niederschlag und kann als Niederschlagsmenge in Abhängigkeit von der Zeit dargestellt werden. Bei sehr hoher Niederschlagsintensität besteht eine leichte Gefahr von Messfehlern durch Massenträgheit. Auch Einflüsse durch Benetzung, Wind und Verdunstungsverluste können zu Messungenauigkeiten führen. Die Erfassung von Schnee erfolgt über das Wasseräquivalent, wenn das Gerät im Winter beheizt wird.

Kippwaagen haben sich in der Vergangenheit als Standardgeräte etabliert und die Messdaten sollen als Vergleichs- oder Bezugsgröße für die nachfolgend beschriebenen Geräte dienen.

Das **Pluvio**<sup>®</sup> ist ein Ombrometer<sup>14</sup> nach Hellmann-Bauweise (das nach einem Wäge-Messprinzip arbeitet) von der OTT Messtechnik GmbH & Co. KG. Das Pluvio<sup>®</sup> führt Messungen im freien Gelände mit einer Gesamt-Mess- Ungenauigkeit (nach Herstellerangaben) kleiner 0,04 mm bei gesammelten 10 mm Niederschlag durch. Im KANNST Projekt wurde ein Pluvio<sup>®</sup> verwendet, das energieautark mit Hilfe von zwei Solarmodulen versorgt wird. Schwankungen des Behältergewichtes durch Windböen sollen durch digitale Filterung unterdrückt werden. Durch diesen Vorgang entstehen leichte Verzögerungen in der Ergebnisausgabe: In niederschlagsfreien Zeiten sowie in Zeiten geringer Niederschlagsintensität (<0,1 mm/Min) arbeitet das Gerät mit der höchsten Filterstufe und einer Ausgabeverzögerung von fünf bis sechs Minuten. Ab Intensitäten über 0,1 mm/Min wird die Ausgabeverzögerung gleitend auf ein bis maximal zwei Minuten verringert, um hohe Niederschlagsintensitäten möglichst zeitnah melden zu können [LANZINGER 2006<sup>15</sup>]. Die Messung erfolgt unabhängig vom Aggregatzustand des Niederschlags. Verdunstungsfehler werden eliminiert, indem nur Gewichtszunahmen registriert werden. Die Verzögerungszeit in der Messwertausgabe ist für den Einsatz einer vorausschauenden Regelung nicht vorteilhaft, da das für die Vorhersage zur Verfügung stehende Zeitfenster weiter eingeschränkt wird.

Das **Wetterradar** stammt von der Firma G. Lufft Mess- und Regeltechnik GmbH (Modell R2S). Die Tropfengeschwindigkeit wird mit einem 24 GHz Dopplerradar erfasst. Anhand der Korrelation von Tropfen-Größe und -Geschwindigkeit wird die Niederschlagsmenge bzw. Niederschlagsintensität erfasst. Die Unterscheidung der Niederschlagsart, Regen oder Schnee, wird durch die unterschiedliche Fallgeschwindigkeit der Partikel bestimmt. Das Niederschlagsradar arbeitet mit einer

<sup>14</sup> Messgerät zur Erfassung von Niederschlag mit einem Auffanggefäß

<sup>15</sup> Niederschlagsmessung und Bereitstellung qualitätsgeprüfter Daten. Hans-B Kleeberg Hrsg.; Niederschlag-Input für Hydrologische Berechnungen. Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Heft 14.06

Auflösung von 0,01 mm. Sehr geringe Tropfengröße und trockener Schnee können unter Umständen nicht richtig erfasst werden, da der Reflexionsquerschnitt zu gering ist.

**Parsivel®** ist ein Laserdistrometer zur Klassifizierung des Tropfenspektrums (Firma OTT Messtechnik GmbH & Co. KG). Das Parsivel® verwendet einen laser-optischen Sensor für die Niederschlagsmessung. Hierbei ist der Grad der Lichtabschattung ein Maß für die Größe des Niederschlagspartikels; in Kombination mit der Signaldauer kann daraus die Fallgeschwindigkeit abgeleitet werden. Das Parsivel® ist das neueste unter den hier vorgestellten Geräten und misst alle Niederschlagsarten, auch Mischformen.

Zusammenfassend ist zu bemerken, dass im Wesentlichen zwei unterschiedliche Messverfahren vorliegen:

- Gruppe 1: Messverfahren nach Hellmann  
Niederschlag wird in einem zylindrischen Behälter mit einer Öffnung von 200 cm<sup>2</sup> gesammelt (Kippwaage, Pluvio®). Die Auswertung erfolgt in Intervallen volumetrisch oder gravimetrisch.
- Gruppe 2: Partikel-Messung  
Messung von Größe und Geschwindigkeit der einzelnen Partikel im freien Fall mittels Impuls/Echo und Dopplerverfahren (Schicht-Radar) oder Laser-Messung (Parsivel®).

Die beschriebenen Niederschlagsmessgeräte sind auf dem Gelände des Regenüberlaufbecken Talstraße wie in Abbildung 46 aufgestellt worden. Die Grafik zeigt, in welchen Abständen die Geräte auf dem Testfeld installiert sind.

Dabei wird darauf geachtet, dass sie nach Empfehlungsangaben der Hersteller aufgebaut sind.

Die Messungen werden auf speziellen Stativen fachgerecht montiert. Die Kippwaage steht auf ebenem Untergrund direkt auf dem Boden. Messgeräte sind dicht beieinander aufgestellt um identische Umgebungsbedingungen zu realisieren. Dabei wird darauf geachtet, dass möglichst keine Beeinträchtigungen der Messung durch benachbarte Geräte oder andere Hindernisse in der Umgebung auftreten.

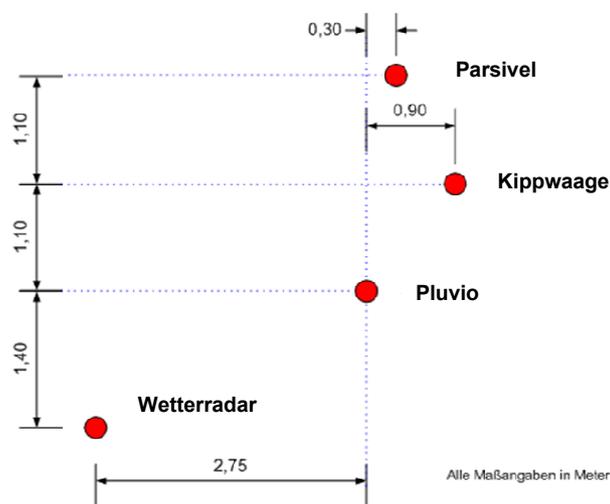


Abbildung 46: Lageplan der Messgeräte am RÜB Talstraße

### 5.4.3 Vergleich der Niederschlagsmessungen

Die Messwerte aller zuvor beschriebenen Messgeräte werden bei unterschiedlichen Niederschlagsereignissen direkt miteinander verglichen. Stellvertretend werden an dieser Stelle Ergebnisse von einem Regenereignis am 21.08.2006 vorgestellt. Verglichen werden Daten des Wetterradars (Schichtadar), der Kippwaage, des Pluvio® und des Parsivel®. Die Messwerte werden in Abbildung 47 vergleichend dargestellt. Die Grafik zeigt die Messergebnisse der vier Messgeräte bei einem leichten

Regenereignis. Auffällig ist eine etwas gröbere Auflösung der Kippwaage gegenüber den anderen Messgeräten, weil sie nur in einer Auflösung von 0,1 mm Schritten messen kann. In der Dynamik ist das Verhalten aller Niederschlagssensoren ähnlich, denn sie erfassen alle gleichmäßig die Regenspitzen. Wie erwartet treffen die Werte des Pluvio® etwas zeitverzögert ein, was ganz deutlich am 21.08. um 21:00 Uhr zu erkennen ist.

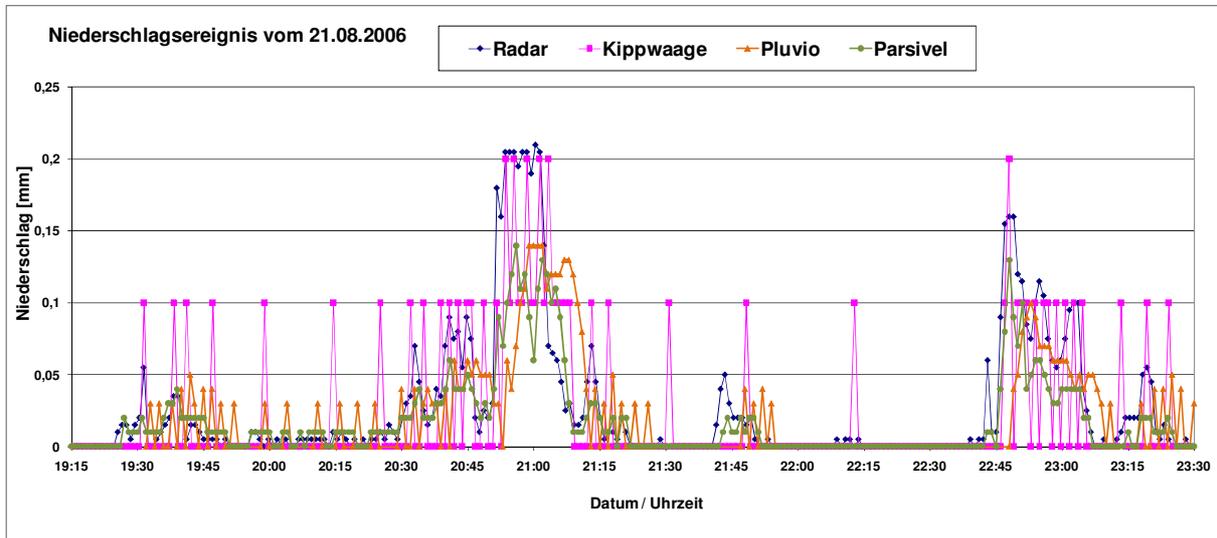


Abbildung 47: Regenereignisse vom 21.08.2006

In einer weiteren Grafik vom 21.08. sind die einzelnen Messwerte der Regenschreiber kumuliert und geben die Niederschlagsmengen wieder (Abbildung 48).

Die Messwerte des Wetterradars liegen insgesamt über denen aller anderen Geräte. Dies konnte durch eine Kalibrierung behoben werden. Die Kippwaage hatte, abgesehen von dem zu diesem Zeitpunkt noch nicht kalibrierten Radar, die höchsten gemessenen Regenwerte.

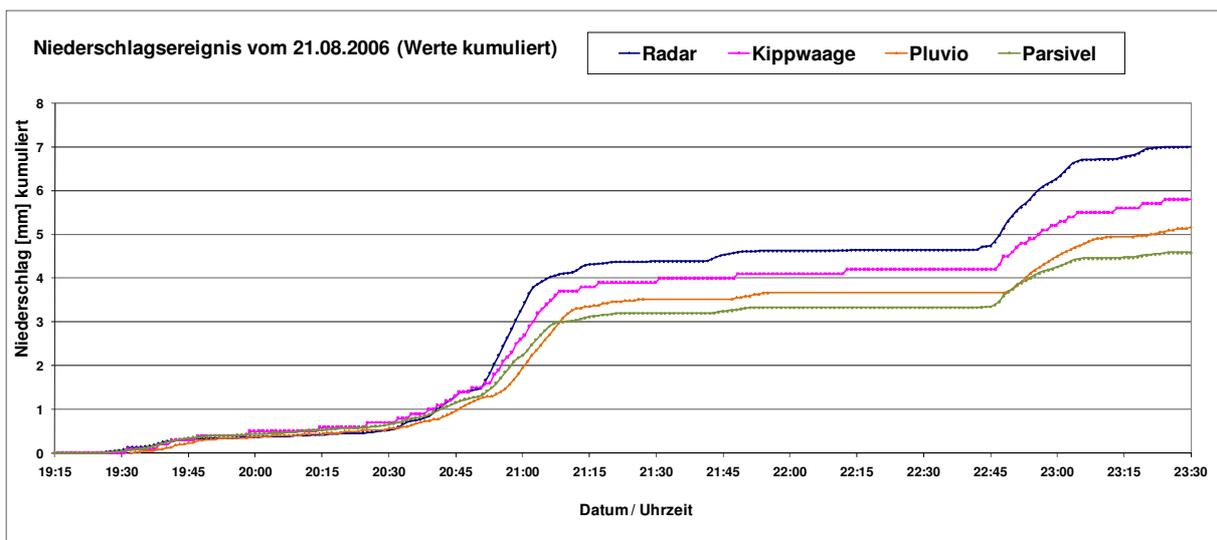


Abbildung 48: Regenereignisse vom 21.08.2006 mit kumulierten Niederschlagsmengen

Mit allen beschriebenen Messgeräten werden weitere Vergleiche bei unterschiedlichen Niederschlagsintensitäten durchgeführt. Der Verlauf der Messkurven ist bei allen Geräten sehr ähnlich. Es existieren jedoch leichte Abweichungen in den gemessenen Gesamtniederschlagsmengen.

Des Weiteren wird der Niederschlag für die Bewertung des Einzugsgebiets Homburg-Bröl, bezogen auf die Einteilung der Niederschlagsintensitäten nach Sprühregen ( $< 0,017$  mm/min), schwachem Regen ( $< 0,043$  mm/min), mäßigem Regen (0,043 bis 0,125 mm/min) und starkem Regen ( $> 0,125$  mm/min) sowie der Niederschlagsmenge untersucht. Die Ergebnisse werden am Beispiel des Pluvio<sup>®</sup> wiedergegeben. Die Auswertungen der anderen Geräte haben kaum Abweichungen ergeben und werden daher nicht extra aufgeführt.

Im Messzeitraum vom 01.06.2006 bis 13.12.2006 werden vom Pluvio<sup>®</sup> insgesamt 550 mm Niederschlag registriert. Davon fallen insgesamt 168 mm mit einer Intensität von "starkem Regen". Die größte Gesamtmenge von 205 mm fällt mit einer Intensität von "mäßigem Regen". "Schwacher- und Sprühregen" führen zusammengefasst zu einer Gesamtniederschlagsmenge von 177 mm. Dieses Ergebnis zeigt eine typische Streubreite der Niederschlagsintensität. Daher muss eine Abflussregelung, abhängig von einer Regenmessung, auf die unterschiedlichen Anforderungen reagieren.

Für die Beurteilung der Gesamtsituation ist auch die räumliche Verteilung der Niederschläge im gesamten KANNST-Gebiet von Interesse. Auf der KA Homburg-Bröl wird eine Kippwaage installiert (wegen der Wichtigkeit im System in redundanter Ausführung) und mit Daten der Regenschreiber am RÜB Talstraße verglichen. So soll herausgefunden werden ob die Niederschlagsverteilung im Einzugsgebiet der Kläranlage große Unterschiede aufweist. Die Auswertung zeigt jedoch keine Differenzen in der Regenverteilung.

Um einen sicheren Betrieb des späteren Regelungssystems zu gewährleisten, werden die Standorte KA, Rommelsdorf und Talstraße mit den Regenschreibern bestückt. Im Einzugsgebiet des RÜB Eckenbach kann kein repräsentativer Standort gefunden werden.

Abschließend ist festzuhalten, dass alle Messgeräte für den Einsatz im KANNST Projekt geeignet sind. Auch die einfache und preiswerte Kippwaage arbeitet robust und zuverlässig.

Über die Erfassung der Niederschlagsmenge hinaus sind das Wetterradarsystem und das Parsivel<sup>®</sup> in der Lage, zwischen der Niederschlagsart Schnee und Regen zu unterscheiden. Dies ist für das Regelungskonzept bei winterlichen Bedingungen von Vorteil. Denn es ist ein Unterschied, ob Niederschlag als Regen direkt oder als Schnee, bis zu mehreren Tagen zeitverzögert, mit Tauwetter oder zusätzlich einsetzendem Regen im Kanal wirksam wird.

Die Untersuchungen im Gerätepark haben gezeigt, dass die Messgenauigkeit der Instrumente vergleichbar und der Wartungsaufwand bei allen sehr gering ist. Nach der Installation und Kalibrierung sind keine weiteren Arbeiten notwendig.

Der Auffangbehälter des Pluvio<sup>®</sup> muss regelmäßig entleert werden, wenn keine Vorrichtung zur automatischen Entleerung angebracht ist.

Das Parsivel<sup>®</sup> kann ebenfalls im Praxis-Einsatz im KANNST Projekt genutzt werden. Allerdings kann beobachtet werden, dass Spinnen bevorzugt ihr Netz im Strahlengang der Sensor-Apparatur aufspannen und es dadurch zu leichten aber nicht gravierenden Beeinträchtigungen der Messungen kommen kann.

#### 5.4.4 Berechnung der Zeiten bis zur Wirksamkeit von Niederschlägen

Zur Beurteilung, inwieweit die Aufzeichnungen der für KANNST eingesetzten Niederschlagsmessgeräte (Kippwaage, Pluvio®, Parsivel®, Schicht-Radar) als Vorhersage einer Belastung des Kanalnetzes dienen, wurden zusätzliche Berechnungen angestellt. Dabei wird die Zeit ermittelt, die zwischen dem Eintreffen des Niederschlags an der Station und dem Wirksamwerden im Kanalnetz vergeht.

Eine Übersicht der errechneten Zeiten ist in Abbildung 49 verdeutlicht [GROLMS 2004<sup>16</sup>].

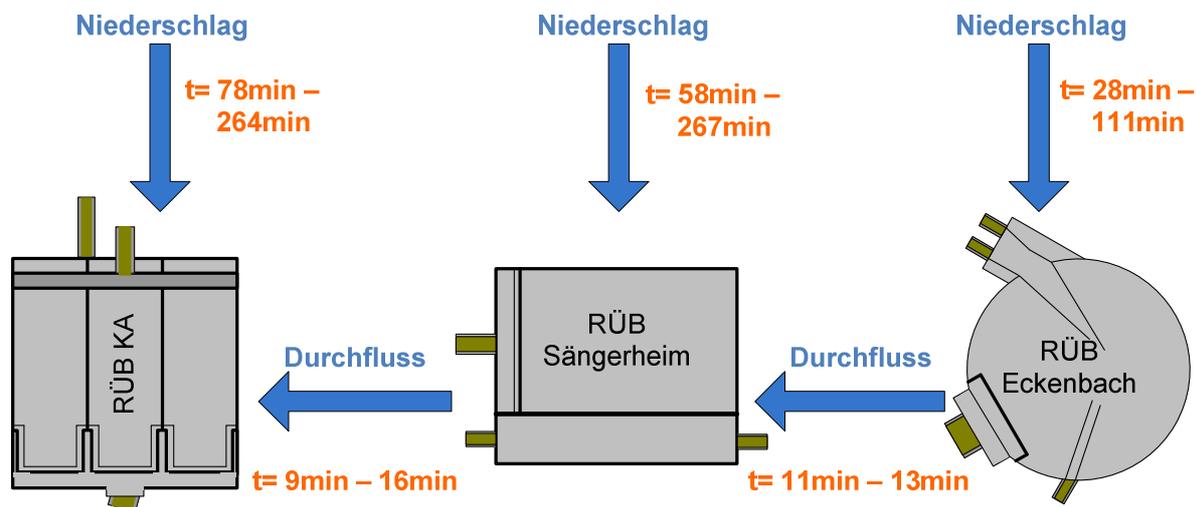


Abbildung 49: Durchfluss- und Niederschlags-Abfluss-Zeiten

Die einzelnen Niederschlagsereignisse sowie die ermittelte Durchflusszeit im Kanal sind dort abgebildet und geben eine Übersicht, wie lange der Niederschlag von einem Punkt im Kanalnetz bis zur Kläranlage braucht und nach einem Niederschlagsereignis wirksam wird. Kenntnisse über diese Totzeiten sind für den Aufbau von Regelkreisen von Bedeutung. Für die Berechnung der Zeiten werden verschiedene Regenereignisse ausgewertet. Dabei können die Zeitverschiebungen durch eine Kreuzkorrelation der Messdaten von den Regenschreiber-Messdaten mit Durchflussmessungen an den RÜB im Kanalnetz ermittelt werden. Bei dieser Methode werden die zu vergleichenden Zeitreihen gegeneinander verschoben, bis eine Übereinstimmung des Verlaufs erkennbar ist.

Die Berechnungen zeigen, dass die gemessenen Niederschlagswerte eine Prognose der Kanalnetzbelastung mit einem zeitlichen Vorsprung von mindestens einer halben Stunde ermöglichen. Damit kann die Regelung des Kanalnetzes diese halbe Stunde als zeitlichen Vorteil nutzen und vorausschauend eingreifen.

### 5.5 Pumpentechnik

Um das Messmedium (Mischwasser) in die Messgerinne der Container zu fördern, werden verschiedene Pumpentypen getestet.

Es werden folgende Definitionen verwendet:

<sup>16</sup> Entwicklung einer lokalen Niederschlagsvorhersage mit Radarmessungen und Niederschlagsmessgeräten. Diplomarbeit an der FH Köln, unveröffentlicht

#### Ablaufpumpe:

Gefördert wird das Abwasser, das in Richtung Kläranlage (über ein Drosselorgan) fließt. Kommt es in Folge von Niederschlägen zu einem Beckeneinstau, so liefert die Ablaufpumpe Mischwasser mit einer Zusammensetzung wie sie dem Einlauf ins RÜB entspricht. Durch Messungen wurde belegt, dass es keine Unterschiede in der Abwasserzusammensetzung bei der gewählten Einbausituation der Probenentnahmepumpe gibt (Schichten, Sediment, Einfluss Trennbauwerk).

#### Entlastungspumpe:

Nach Vollfüllung des Beckens wird im Entlastungsfall der Klärüberlauf (KÜ) überströmt. Das behandelte Abwasser fließt ins Gewässer. Die Entlastungspumpe saugt Mischwasser aus dem Bereich des KÜ an. Auch für diese Einbausituation wird nachgewiesen, dass es für die gemessenen Parameter nicht relevant ist, dass die Pumpe etwas vor der Tauchwand und unterhalb der Wasseroberfläche montiert ist.

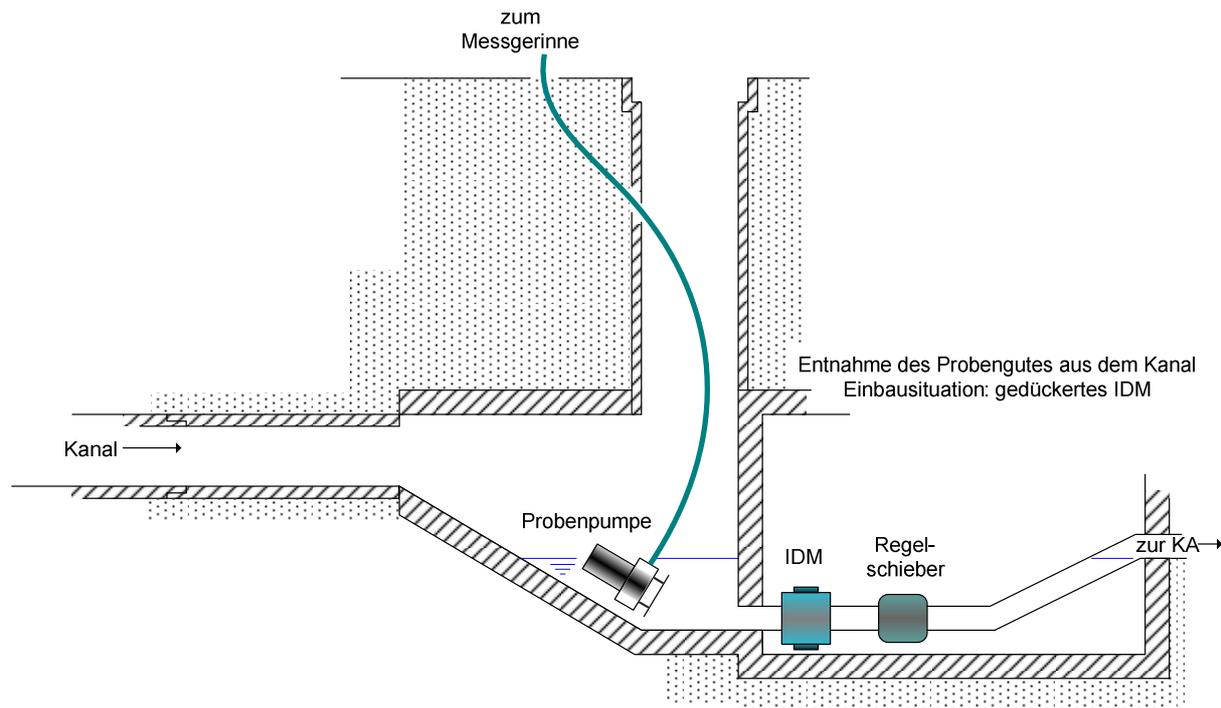
Bei den ausgewählten RÜB gibt es an den meisten Betriebsorten eine Ablaufpumpe zum Befüllen des Ablaufgerinnes (Gerinne 1) mit Medium aus dem Kanal. Sie läuft dauerhaft und wird nur für die automatischen Spülintervalle zur Reinigung des Gerinnes kurzzeitig vom Netz genommen.

Die Entlastungspumpe beschickt das Entlastungsgerinne (Gerinne 2). Sie wird nur im Entlastungsfall eingeschaltet. Um sicher zu stellen, dass eine Entlastungssituation zuverlässig erkannt wird und die Pumpe nicht trocken läuft, ist das Einschaltsignal an Sicherheitsbedingungen geknüpft.

Im Folgenden werden die beiden Einbausituationen (Ablauf und Entlastung) genauer beschrieben. Je nach Einbauort werden unterschiedlichen Anforderungen an die Aggregate gestellt.

### 5.5.1 Pumpe im Ablauf zur Kläranlage (Kanal)

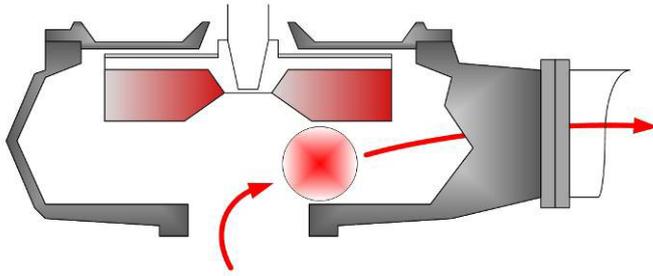
Dem Kanal entnommenes, zu beprobendes Mischwasser durchläuft ein gut zugängliches, im Messcontainer aufgestelltes Messgerinne. An dieser Stelle ist die Onlinemesstechnik und der Probenehmer installiert. Neben gängigen Parametern wie pH, NH<sub>4</sub>-N und Temperatur, fallen durch den Einbau entsprechender Sensoren auch spektrographische Werte an, aus denen Parameter wie z.B. der CSB abgeleitet werden.



**Abbildung 50: Einbausituation für eine Probenentnahmepumpe bei einer gedückerten Durchflussmessung**

Je nach Einbauort und Lage der explosionsgeschützten Pumpen kann es unter bestimmten Umständen zu thermischen Problemen kommen. Die Motorwicklungen laufen Gefahr zu überhitzen wenn die Pumpe nicht ausreichend mit Abwasser überdeckt, bzw. in einem Sturzbauwerk dem „Kühlwasserstrom“ nur teilweise ausgesetzt ist. In diesen speziellen Fällen springt immer wieder die Überwachungseinrichtung der Motorwicklung an und die Pumpe fällt mit quittierungspflichtiger Störmeldung aus. Bei der Planung für solche Einsatzbereiche ist darum bereits im Vorfeld auf stärker isolierte Wicklungen oder zusätzlichen Kühleinrichtungen zu achten.

Zu Projektbeginn werden in diesem Bereich Pumpen mit Schneidwerk eingesetzt, um Probleme im Messgerinne durch Grobstoffe, Verzopfungen usw. zu vermeiden. Dabei stellt sich aber schnell heraus, dass damit erhebliche Wartungs- und Unterhaltskosten einhergehen. Der große personelle Aufwand für das häufige Auswechseln der Schneidwerke und die damit verbundenen hohen Materialkosten sind dauerhaft nicht tragbar. Die unerwünschte, aber praktisch kaum zu verhindernde Förderung von Sanden und Schluff führt zu einem enormen Verschleiß der Schneidwerke. Verbessert werden kann die Lage erst durch Umrüstung auf Freistromradpumpen. Bei einer Freistromradpumpe entsteht die Strömung nicht durch das Laufrad selbst, sondern durch einen sich schnell drehenden Wirbel, der vom Laufrad erzeugt wird. Dabei werden alle förderbaren Inhaltstoffe (freier Kugeldurchgang) dem Messgerinne zugeführt.



**Abbildung 51: Skizze Freistromrad-Pumpe**

In der folgenden Gegenüberstellung sind Vor- und Nachteile der verwendeten Pumpenarten aufgeführt und bewertet:

**Tabelle 2: Gegenüberstellung Schneidwerk-Pumpen/Freistromrad-Pumpen für KANNST**

Schneidwerk-Pumpen	Freistromrad-Pumpen
+ geringere Rohrleitungsquerschnitte, da Feststoffe zerkleinert werden	+ geringer Verschleiß
+ geeignet für große Förderhöhen bei relativ geringer Fördermenge	+ Feststoffe werden problemloser gefördert
+ weniger grobe Verschmutzungen an Messgerinne und Sensoren	+ geringere Verstopfungsanfälligkeit
-- hoher Verschleiß	- geringerer Wirkungsgrad

Zunächst werden Schneidwerkumpen als voll überflutbare, einstufige Kreiselpumpen mit offenem Mehrschaufelrad und vorgeschalteter Schneideinrichtung eingesetzt (s. Abbildung unten).



**Abbildung 52: Ablaufpumpe mit Schneidwerk**

Aufgrund des extremen Verschleißes werden diese Aggregate wo immer möglich durch Freistromrad-Pumpen ersetzt. An einzelnen Betriebspunkten mit besonders großer Förderhöhe muss der Betrieb mit den störungsanfälligeren aber diesbezüglich leistungsfähigeren Geräten beibehalten werden (z.B. am RÜB Sägerheim).

Die durch den Pumpenwechsel auftretenden, stärkeren Verschmutzungen der Gerinne durch Grobstoffe stellen sich als weniger gravierend heraus als erwartet. Mäßige Verschmutzung ist hier eher tolerierbar als eine hohe Ausfallrate der Pumpe.

### 5.5.2 Pumpe zur Probenahme „Entlastung RÜB“

Wie auf der Abbildung 53 dargestellt sitzt an jedem zu beprobenden Becken eine Pumpe in Höhe der Entlastungsschwelle zwischen Tauchwand und Wehr. Damit wird es im Gegensatz zu einer ebenso denkbaren Konstruktion hinter der Entlastungsschwelle möglich, bei dem Einsetzen auch geringer Entlastungen unmittelbar Probengut aus dem RÜB ins Vorlagegerinne zu befördern. Mit Umsetzung der beschriebenen Konstruktion ist immer für eine ausreichende Pumpenvorlage gesorgt. Damit Schwimmstoffe ferngehalten werden, wird für die Entlastungspumpen eine separate Tauchwand konstruiert (Abb. 53).

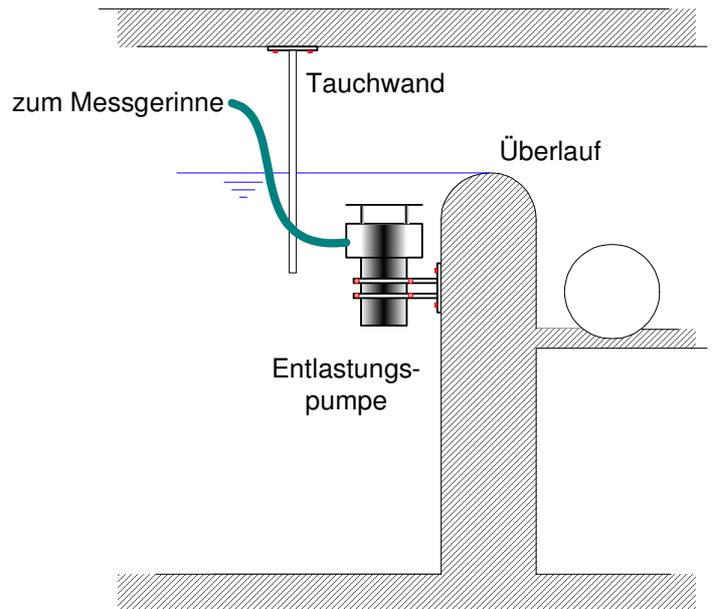
Die Einbauposition der Pumpe über Kopf unterhalb des Wasserspiegels „Entlastung“ reduziert die Eintauchtiefe. So ist vor dem Einschalten der Pumpe immer gewährleistet, dass diese vollständig eingetaucht ist. Dadurch wird der Ex-Schutz gewährleistet. Die Sicherheit wird zusätzlich durch eine Plausibilitätsprüfung der eingebauten SPS sichergestellt. Die Pumpe wird nur dann eingeschaltet, wenn folgende Bedingungen zeitgleich erfüllt sind:

- Das Becken ist voll (z.B. Füllstand größer 97%, variiert abhängig vom RÜB, Drucksonde erzeugt Füllstand-Signal)
- Füllstand in Höhe des Klärüberlaufs (Signal-Stabsonde) ist erreicht
- es fließt eine bestimmte Mindest-Entlastungswassermenge (wird aus der gemessenen Überfallhöhe berechnet)
- keine der Größen 1-3 ist gestört

Der Schnitt (Abbildung 54) zeigt den Einbauort der Entlastungspumpe im RÜB.



Abbildung 53: Entlastungspumpe RÜB Kalkofen



**Abbildung 54: Einbausituation für eine Probenentnahmepumpe am KÜ (Schnitt)**

Durch eine ausreichend tief gelegene Platzierung unterhalb des Wasserspiegels wird verhindert, dass die Pumpe „schlüpft“. Es werden Pumpen der gleichen Baureihe wie zur Beprobung des Ablaufs verwendet. Da in der Entlastung weniger große Feststoffe enthalten sind als im Ablauf, konnte allerdings ein kleineres Pumpenmodell montiert werden.

In der Praxis erweisen sich die Entlastungspumpen als sehr zuverlässig.

## 6 Analyse des Ist-Zustands

In der ersten Projektbesprechung im Hause der Bezirksregierung am 13.10.2005 wurde bei der Abstimmung der weiteren Vorgehensweise festgelegt, dass an jedem Betriebspunkt, an dem später die Drosselwassermenge variabel geregelt werden soll, ein Jahr zur Bestandsaufnahme gemessen werden muss.

Bei einer Bestandsaufnahme werden die Gegebenheiten im Kanalnetz vor Installation der Steuerung aufgenommen. Dazu werden charakteristische Größen wie z.B. Entlastungsraten, Einstaudauer, Drosselwassermengen, Frachten usw. im konventionellen Kanalnetz bestimmt. Die in diesem Zusammenhang gesammelten Daten dienen als Nachweis für die funktionierende Simulation des unregulierten Netzes. Mit Hilfe der Simulation können verschiedene Regelalgorithmen ohne Risiko getestet werden. Hierbei wird das Verhalten des unregulierten Netzabbildes mit dem eines auf bestimmte Weise geregelten Netzes verglichen. Die Bestandsaufnahme („Feststellung des Ist-Zustands“) ist notwendig um in späteren Auswertungen einen Nachweis über die Wirkungsweise der Kanalnetzsteuerung zu erbringen. Werte von den bereits vorhandenen Messvorrichtungen an den RÜB (Füllstand, Entlastungsmenge, Drosselwassermenge) werden von der Prozessdatenverarbeitung (PDV) aufgezeichnet. Weitere Messdaten stammen von der für das Projekt installierten Analytik am unregulierten Kanalnetz.

Im konkreten Fall ist für die RÜB Rommelsdorf, Hast, Talstraße, Kalkofen, Eckenbach, Sängenheim und RÜB Kläranlage folgender Probe-Entnahmeplan festgelegt worden:

Aus dem Kanal am RÜB wird ein Jahr lang mit dem automatischen Probenahmegerät jeweils ein monatliches Messprogramm durchgeführt, bei dem eine Tagesganglinie aus 12-mal Zwei-Stunden-Mischproben erstellt wird. Daraus resultieren 12 Ganglinien im Jahr, wobei möglichst je vier Ganglinien aus den drei Kategorien Trockenwetterzufluss, Kurzregenereignis und Starkregenereignis ausgewählt werden. Sondermessprogramme mit abweichenden Intervallen verdichten die Datenbasis. Weiterhin begleiten NH<sub>4</sub>-N- und CSB-Onlinemessungen die Bestandsaufnahmen.

Es ist vorgesehen, jedes einzelne Entlastungsereignis automatisch zu beproben. Begonnen wird dabei mit 24 separaten „Ein-Stunden-Mischproben“, die schrittweise bis auf 24 x 5-Minuten-Stichproben reduziert werden. Diese Stichproben in kurzer Zeitfolge sind am ehesten dazu geeignet einen auftretenden Spülstoß nach einer Trockenperiode zu untersuchen, denn nach etwa zwei Stunden stagniert der Konzentrationsverlauf.

### 6.1 Kennzahlen der Bestandsaufnahmen

Aus den Onlinemessdaten der PDV und den Laboranalysen wurden folgende Kennzahlen ermittelt.

**Tabelle 3: Kennwerte der KANNST-RÜB aus Bestandsaufnahmen (Strang Waldbröl)**

Parameter	Rommelsdorf	Hast	Talstraße	Kalkofen
Messzeitraum von / bis	15.04.2006 15.04.2007	15.04.2006 15.04.2007	01.01.2006 31.12.2006	01.01.2008 01.01.2009
Einstaudauer	1.049 h	2.639 h	2.074 h	379 h

<b>Entladungsdauer</b>	217 h	846 h	959 h	---
<b>Entlastungsmenge</b>	35.149 m <sup>3</sup>	98.910 m <sup>3</sup>	355.221 m <sup>3</sup>	---
<b>Entlastungsanteil</b>	0,21	0,32	0,46	---
<b>Entlastungsrate</b>	0,17	0,25	0,37	---
<b>Entlastungshäufigkeit</b>	9 n	20 n	19 n	1
<b>Volleinstau / Einstaudauer</b>	21 %	70 %	72 %	4 %
<b>Niederschlagsmenge</b>	1.195 mm/a	1.156 mm/a	1.115 mm/a	1.094 mm/a
<b>Fracht CSB</b>	958 kg/a	4.717 kg/a	16.987 kg/a	---
<b>Entlastungsrate CSB-Fracht</b>	0,017	0,071	0,124	---
<b>Fracht AFS</b>	1.444 kg/a	3.513 kg/a	12.694 kg/a	---
<b>Maximum NH3-N</b>	0,0995 mg/l	0,018 mg/l	0,012 mg/l	---

**Tabelle 4: Kennwerte der KANNST-RÜB aus Bestandsaufnahmen (Strang Nümbrecht)**

Parameter	Eckenbach	Sängerheim	RÜB Kläranlage
<b>Messzeitraum von / bis</b>	01.10.2006 30.09.2007	01.10.2006 30.09.2007	15.09.2007 15.09.2008
<b>Einstaudauer</b>	1.609 h	2.031 h	2.396 h
<b>Entladungsdauer</b>	223 h	252 h	725 h
<b>Entlastungsmenge</b>	107.252 m <sup>3</sup>	49.648 m <sup>3</sup>	198.277 m <sup>3</sup>
<b>Entlastungsanteil</b>	0,14	0,12	0,30
<b>Entlastungsrate</b>	0,21	0,05	0,15
<b>Entlastungshäufigkeit</b>	22 n	19 n	10 n
<b>Volleinstau / Einstaudauer</b>	15 %	38 %	33 %
<b>Niederschlagsmenge</b>	1.404 mm/a	1.404 mm/a	1.144 mm/a
<b>Fracht CSB</b>	4.678 kg/a	2.481 kg/a	9.529 kg/a
<b>Entlastungsrate CSB-Fracht</b>	0,020	0,005	0,012
<b>Fracht AFS</b>	4.721 kg/a	1.809 kg/a	9.744 kg/a
<b>Maximum NH3-N</b>	0,0454 mg/l	0,0194 mg/l	0,0042 mg/l

Die Kennzahlen werden für die verschiedenen RÜB für gleich lange Messzeiträume (jeweils ein Jahr) bestimmt, jedoch verlaufen die Bestandsaufnahmen kalendarisch nicht parallel (z.T. unterschiedliche Startzeitpunkte). Aus diesem Grund sind die Zahlen der einzelnen RÜB nicht direkt miteinander vergleichbar. Die Zahlen geben jedoch durch die Beprobung jeweils über ein ganzes Jahr einen guten Überblick über die Gesamtsituation im unregelmäßigen Kanalnetz Homburg-Bröl.

Auffällig sind die beträchtlichen Überlaufaktivitäten an den RÜB Talstraße und RÜB KA, verbunden mit entsprechend großen Frachten. In einem Bericht des IKT<sup>17</sup> werden beide Becken ebenso als Entlastungsschwerpunkte ausgewiesen (vergl. nachfolgenden Abschnitt „Regionalanalyse“):

- Entladungsdauer RÜB Talstraße: Sehr lang

<sup>17</sup> IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur gGmbH „Wasserstandsmessungen an Regenbecken und Stauraumkanälen - Auswertung von Einstau- und Entlastungsereignissen am Beispiel des Aggerverbandes“

- Entlastungsdauer RÜB Kläranlage Homburg-Bröl: Lang

Laut einer Untersuchung vom 15.05.2009 ist die Wehrmessung am Klärüberlauf des RÜB Talstraße unter bestimmten Umständen durch Rückstau beeinflusst. Ursächlich für den Rückstau sind die Abflussbedingungen in dem nachgeschalteten Regenrückhaltebecken und die Wasserstände im Gewässer bei Hochwassersituationen. Es ist nicht auszuschließen, dass im Zeitraum der Bestandsaufnahme die Rückstauproblematik im Ausnahmefall zu tendenziell überhöhten aufgezeichneten Gesamtentlastungswassermengen geführt hat.

Bemerkenswert sind die maximalen Werte für Ammoniak-Stickstoff (NH<sub>3</sub>-N) in den Entlastungen der RÜB Rommelsdorf und Eckenbach (s. Tabelle 3 und 4). Die Berechnung wird im nachfolgenden Abschnitt „NH<sub>4</sub>-N- und NH<sub>3</sub>-N-Konzentrationen der Entlastungen“ beschrieben. Beim RÜB Rommelsdorf sind für mehrere Entlastungen hohe Konzentrationen bestimmt worden. Sie gehen aus pH-Werten von teilweise größer als 8,5 in Kombination mit hohen Wassertemperaturen hervor. Derartige pH-Werte sind für das Einzugsgebiet sehr ungewöhnlich. Eine Erklärung konnte nicht dafür gefunden werden. Für Details und weitere Informationen sind zusätzliche Untersuchungen notwendig.

Zur Bewertung wird der NH<sub>3</sub>-N-Maximalwert in Relation zu Richtwerten der so genannten 9er-Matrix „Vereinfachter Nachweis für Salmonidenlaichgewässer BWK/M3L“ gesetzt. Laut Matrix sind NH<sub>3</sub>-N Werte bis zu 0,15 mg/l im Gewässer zulässig, solange sie nur selten genug (< 4 n/a) und über einen Zeitraum kleiner eine Stunde auftreten. Im konkreten Fall wurde der Extremwert jedoch nur in einer 3-Minutenprobe (<< 1h) festgestellt. Da die NH<sub>3</sub>-N-Konzentration der Entlastung durch den Eintrag ins Gewässer erheblich verdünnt wird, ist eine solche Belastung im Einzelfall vertretbar.

## 6.2 Mittlere CSB-Konzentration im Kanal

Mittlere CSB-Konzentrationen (A128) im Kanal sind charakteristische Kenngrößen für ein Kanalnetz. Sie dienen als Grundlage zur Berechnung weiterer wichtiger Parameter. Zur Ermittlung der CSB-Konzentrationen werden die analysierten 2h-Mischproben der Tagesganglinien in zwei Gruppen aufgeteilt:

1. Proben bei Trockenwetterabfluss
2. Proben bei Regenabfluss

Für jede Gruppe erfolgte gesondert eine Mittelwertberechnung. Die untere Tabelle zeigt die Ergebnisse beispielhaft für zwei KANNST-RÜB.

Tabelle 5: Mittlere CSB-Konzentration im Kanal

RÜB	RÜB Talstraße	RÜB Hast	ATV A128 <sup>18</sup>
CSB-Konz. im Trockenwetterabfluss	287,5 mg/l	550,2 mg/l	600,0 mg/l
CSB-Konz. im Regenabfluss	174,1 mg/l	165,3 mg/l	107,0 mg/l
Jahresniederschlagshöhe	1.115 mm	1.156 mm	800 mm

<sup>18</sup> Vergleichswerte gemäß ATV-A128

### 6.3 Abschätzung der Entlastungsrate bezogen auf die CSB-Fracht

Die Entlastungsraten der CSB-Fracht können aus den CSB-Mittelwerten der in der Bestandsaufnahme erfassten 2h-Mischprobenganglinien (Entlastung und Ablauf zur KA) sowie den dazugehörigen Wassermengen berechnet werden. Die CSB-Mittelwerte werden dafür nach Regen- und Trockenwetter klassifiziert. CSB-Frachten im Ablauf zur KA respektive in der Entlastung werden dann aus den entsprechenden CSB-Mittelwerten und den Wassermengen berechnet. Die ermittelten Entlastungsraten sind in der unteren Tabelle dargestellt. Bei der Bestimmung der Entlastungsraten werden konstante Konzentrationen angesetzt.

**Tabelle 6: Abschätzung der Entlastungsrate bezogen auf die CSB-Fracht**

CSB Frachten	RÜB Talstraße	RÜB Hast
Messzeitraum von / bis	01.01.2006 31.12.2006	15.04.2006 15.04.2007
Entlastungsfracht [kg]	16.978	4.717
Q Ablauf zur KA [m <sup>3</sup> ]	614.805	99.671
CSB-Fracht Ablauf zur KA [kg] 1 Nachlaufstag	125.301	68.980
CSB-Fracht Ablauf zur KA [kg] 2 Nachlaufstage	120.074	62.239
CSB-Fracht Entlastungsrate, 1 Nachlaufstag	0,12	0,06
CSB-Fracht Entlastungsrate, 2 Nachlaufstage	0,12	0,07
Anzahl 2h-Mischprobenganglinien	13	10

### 6.4 Mittlere CSB-Konzentration der Entlastungen

In den folgenden Grafiken sind sämtliche CSB-Ganglinien aller erfassten Entlastungsereignisse bei den beiden RÜB dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Konzentrationsverläufe von verschiedenen Ereignissen ähnliche Muster aufweisen. Für das RÜB Talstraße ergeben sich mittlere CSB-Konzentrationen von ca. 100 mg/l in den ersten 30 Minuten der Entlastung. Im weiteren Verlauf ist ein starkes Absinken auf Werte um 50 mg/l zu beobachten. Ab etwa 1,5 Stunden nach Entlastungsbeginn wird ein Konzentrationslevel mit geringer Schwankungsbreite erreicht.

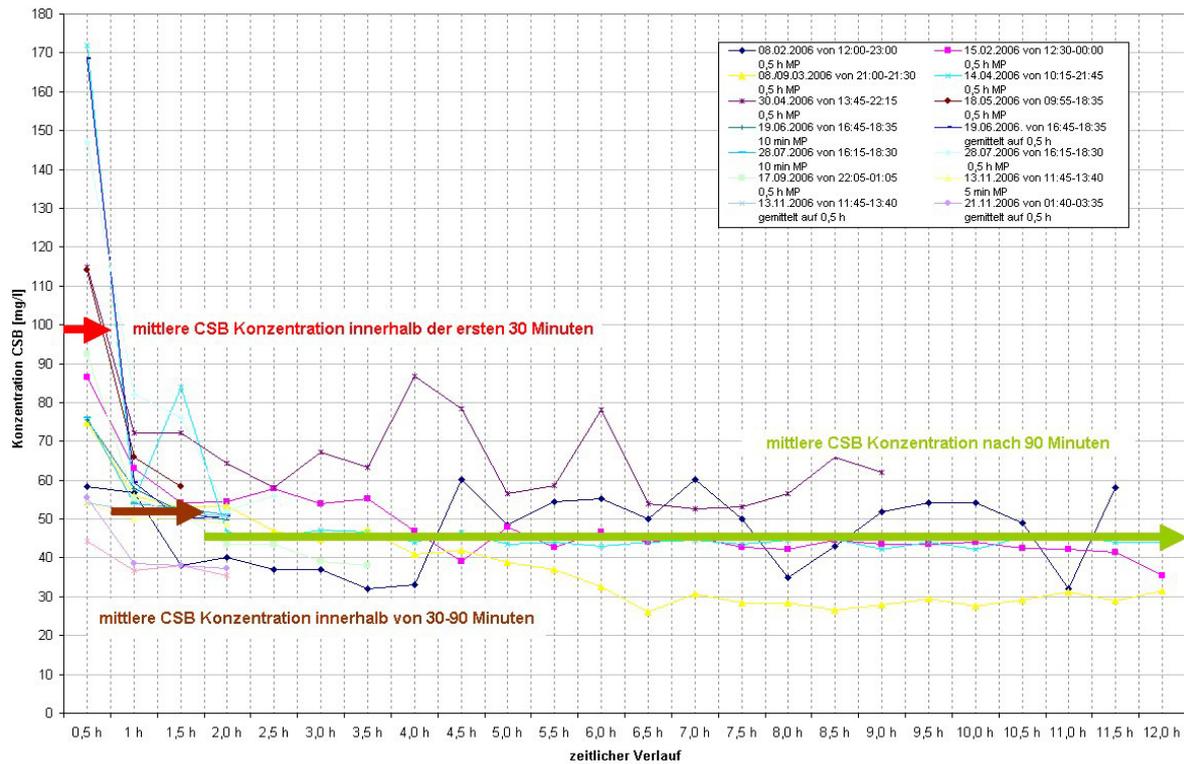


Abbildung 55: RÜB Talstraße - mittlere CSB-Konzentration der Entlastungen

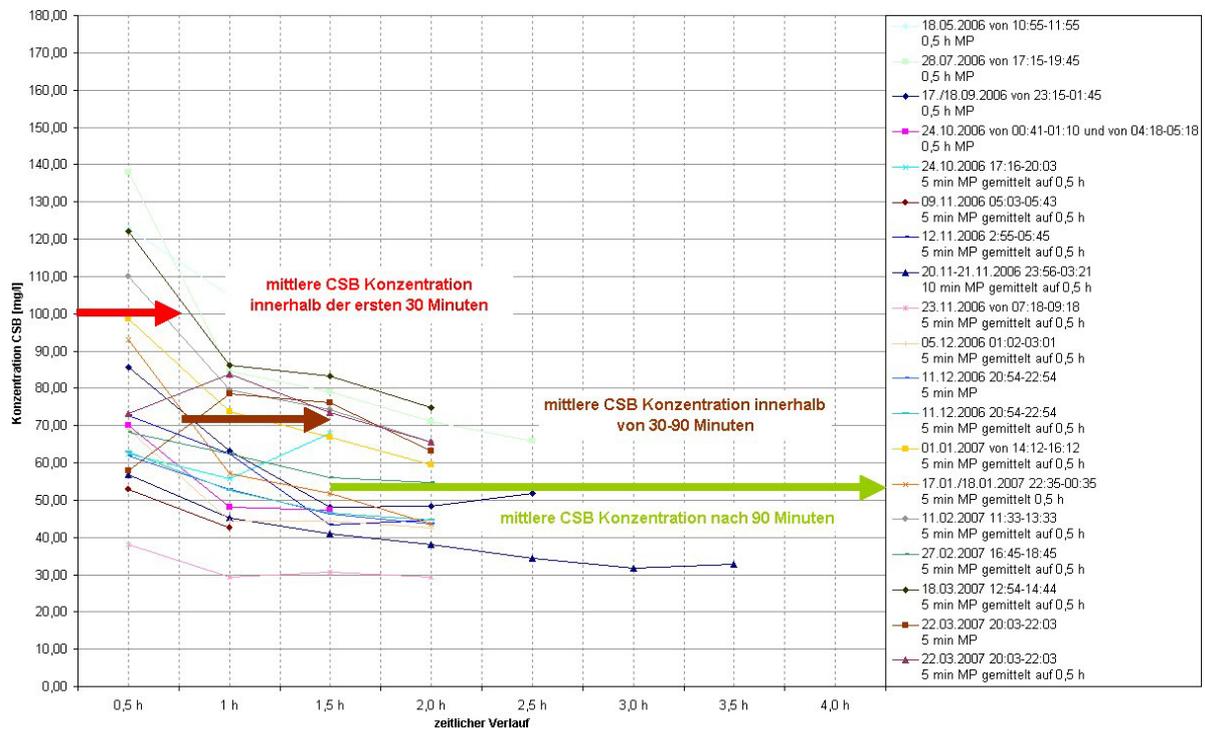


Abbildung 56: RÜB Hast - mittlere CSB-Konzentration der Entlastungen

Ein weniger stark ausgeprägtes Absinken der Konzentrationen nach den ersten 30 Minuten ist beim RÜB Hast festzustellen. Bei zwei Ereignissen ist die CSB-Belastung in dieser Zeit sogar geringfügig angestiegen.

## 6.5 Mittlere AFS-Konzentration der Entlastungen

Entlastungsproben sind während den Bestandsaufnahmen nicht nur auf den Parameter CSB hin untersucht worden, sondern es wird auch der Anteil von abfiltrierbaren Stoffen bestimmt. Analog zu den obigen CSB-Verläufen zeigen die nachfolgenden Diagramme AFS-Konzentrationen bei unterschiedlichen Entlastungsereignissen.

In der Abb. 57 wird deutlich, dass die AFS-Belastung in der Regel bereits nach einer Stunde stark gesunken ist. Danach ist längerfristig eine Tendenz zu nur noch geringfügig niedrigeren Konzentrationen auszumachen.

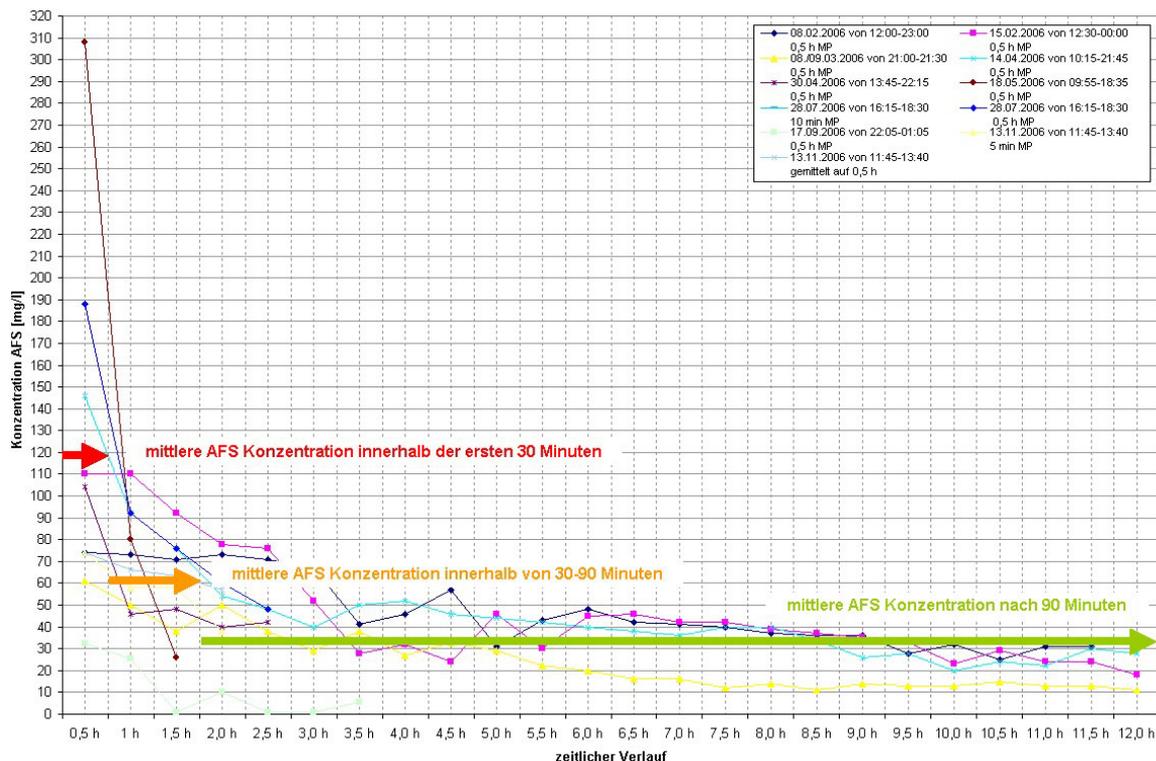


Abbildung 57: RÜB Talstraße - mittlere AFS-Konzentrationen in den Entlastungen

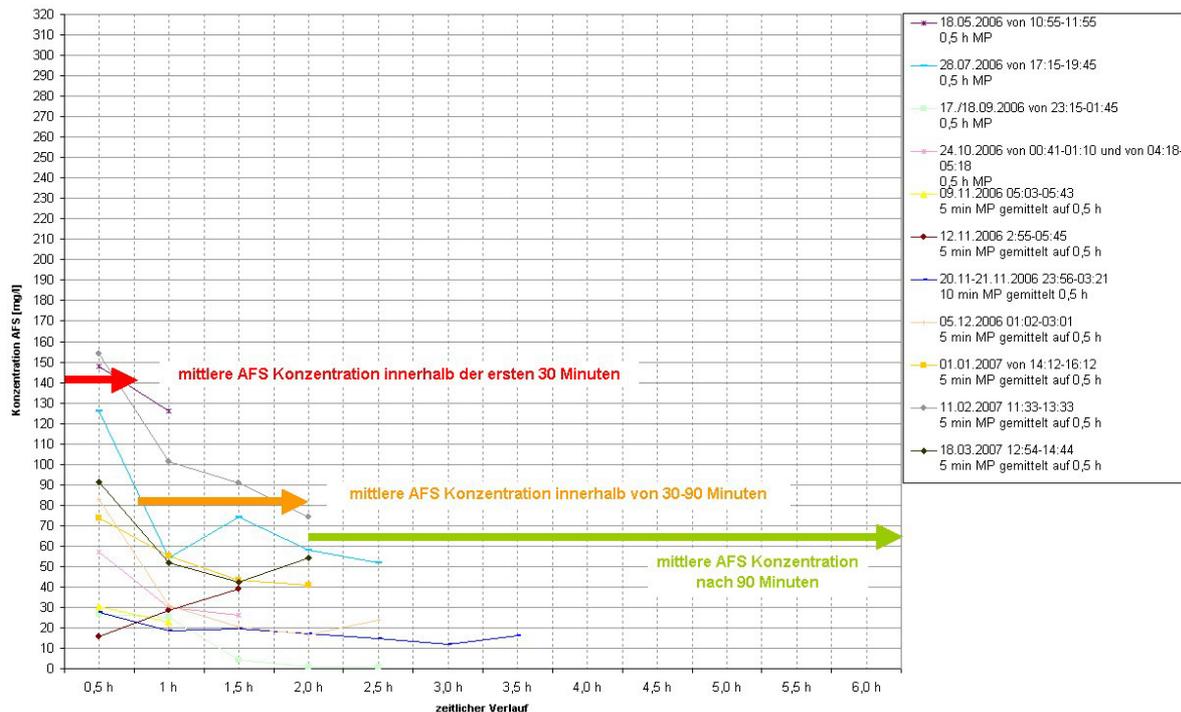


Abbildung 58: RÜB Hast - mittlere AFS-Konzentration der Entlastungen

## 6.6 NH<sub>4</sub>-N- und NH<sub>3</sub>-N-Konzentrationen der Entlastungen

Anhand von Laboranalysen wird der Gehalt von Ammonium-Stickstoff in den Entlastungsproben festgestellt. Ammonium wird in Abhängigkeit von pH-Wert und Temperatur zu giftigem Ammoniak umgewandelt. Nach Emerson [1975<sup>19</sup>] gilt folgende Beziehung:

$$\text{NH}_3\text{-N} = \frac{1}{10^{(P_{ks}-\text{pH})} + 1} \cdot \text{NH}_4\text{-N} \text{ [mg/l]} \quad \text{mit} \quad P_{ks} = 0,09018 + \frac{2729,92}{273,2 + T}$$

Ist der Anteil von Ammonium-Stickstoff, die Temperatur und der pH-Wert bekannt, so kann die Konzentration von Ammoniak-Stickstoff berechnet werden. Onlinemessungen im Entlastungsgerinne liefern während eines Ereignisses kontinuierlich Messwerte für die Größen pH-Wert und Temperatur. Diese Messwerte können den analysierten Proben des automatischen Probennehmers zeitlich zugeordnet werden. Es stehen punktuell alle Größen zur Berechnung des Ammoniak-Stickstoffs zur Verfügung.

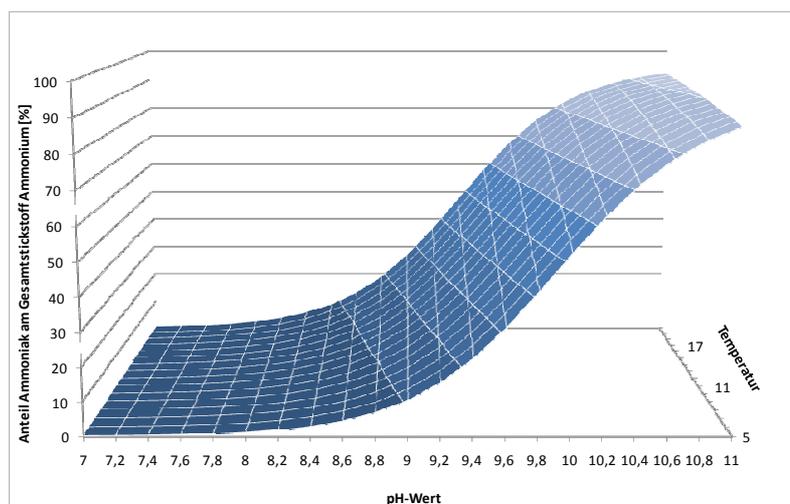


Abbildung 59: Gleichgewichtsverteilung zwischen Ammonium und Ammoniak

<sup>19</sup> Emerson, K., R.C. Russo, R.E. Lund, and R.V. Thurston. 1975. Aqueous ammonia equilibrium calculations: effect of pH and temperature. Journal of the Fisheries Research Board of Canada. 32:2379-2383

Nachstehende Diagramme enthalten zeitliche Verläufe von Ammonium-Stickstoff-Konzentrationen während mehrerer Entlastungsereignisse im Zeitraum der Bestandsaufnahmen.

Zusätzlich sind dort die nach obiger Formel berechneten Ammoniak-Stickstoff-Konzentrationen eingetragen. Typischerweise liegen diese Werte unterhalb von 0,02 mg/l. Einmalig aufgetretene Maximalwerte sind den Tabellen „Kennwerte der KANNST-RÜB aus Bestandsaufnahmen“ zu entnehmen.

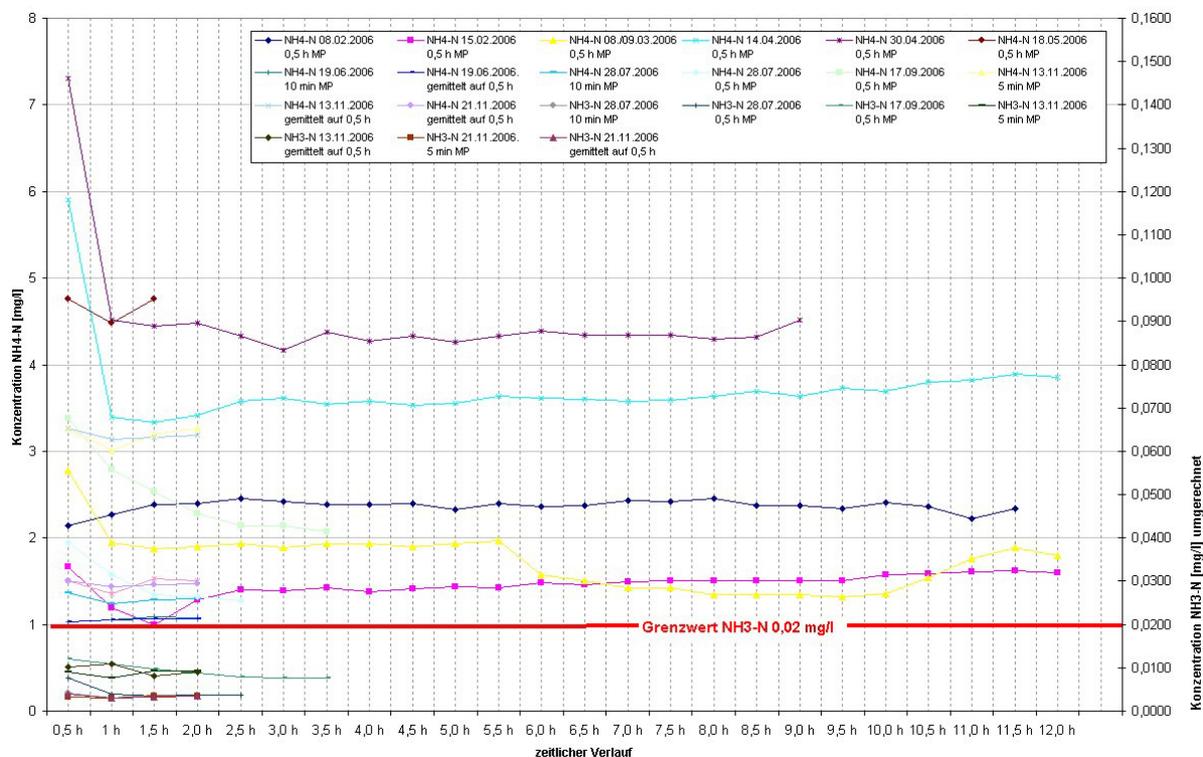


Abbildung 60: Ammonium-Stickstoff und Ammoniak-Stickstoff-Konzentrationen der Entlastungen am RÜB Talstraße<sup>20</sup>

Die NH<sub>4</sub>-N-Werte der Entlastung am RÜB Talstraße liegen meist zwischen 1 und 4 mg/l. Der mittlere NH<sub>4</sub>-N-Gehalt beträgt in den ersten 30 Minuten der Entlastungen 3,3 mg/l bei einem Maximalwert von 7,3 mg/l zu Beginn eines einzelnen Ereignisses. Für die restliche Zeit der Entlastungsereignisse beträgt der mittlere NH<sub>4</sub>-N-Gehalt etwa 2,5 mg/l.

<sup>20</sup> Grenzwert NH<sub>3</sub>-N von 0,02 mg/l unter der Voraussetzung, dass das Gewässer morphologisch saniert ist

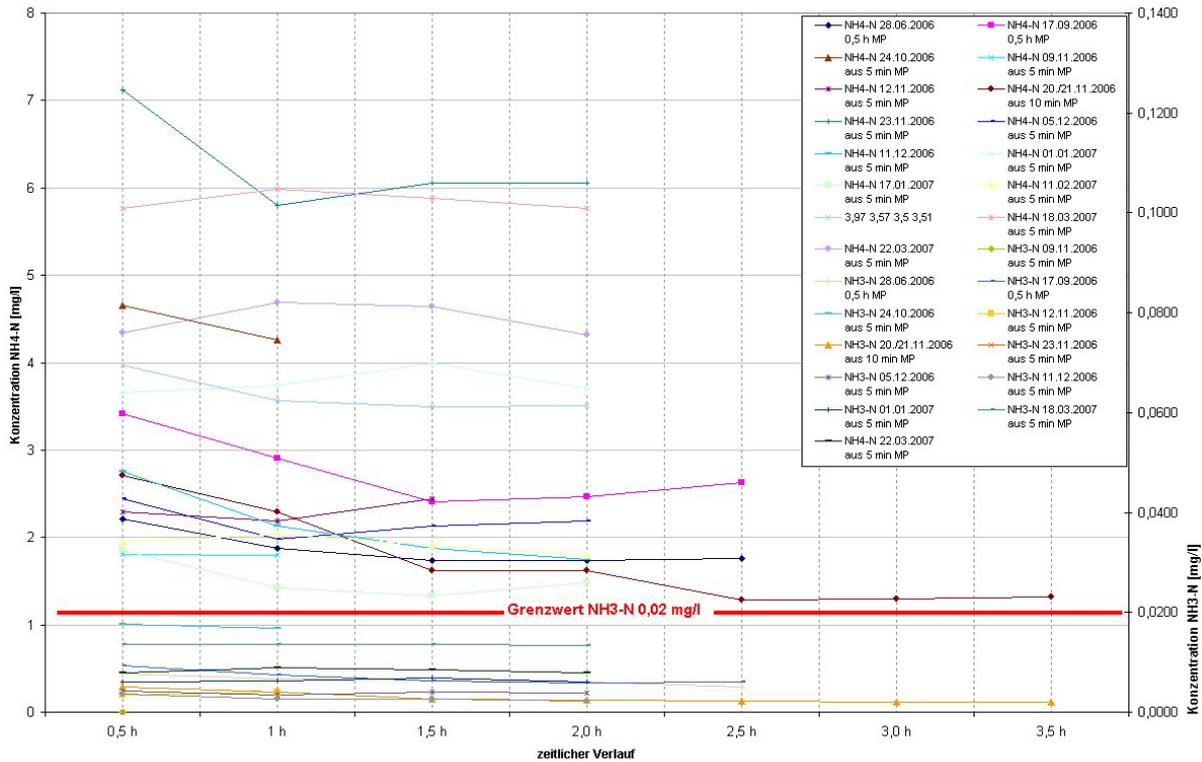


Abbildung 61: Ammonium-Stickstoff- und Ammoniak-Stickstoff-Konzentrationen der Entlastungen am RÜB Hast<sup>21</sup>

Die NH<sub>4</sub>-N-Werte der Entlastung am RÜB Hast liegen meist zwischen 1 und 5 mg/l. Der mittlere NH<sub>4</sub>-N-Gehalt beträgt in den ersten 30 Minuten der Entlastungen 3,4 mg/l bei einem Maximalwert von 7,1 mg/l zu Beginn eines einzelnen Ereignisses. Für die restliche Zeit der Entlastungsereignisse beträgt der mittlere NH<sub>4</sub>-N-Gehalt etwa 2,9 mg/l.

## 6.7 Regionalanalyse

Die Regionalanalyse des IKT-Berichtes „Wasserstandsmessungen an Regenbecken und Stauraumkanälen - Auswertung von Einstau- und Entlastungsereignissen am Beispiel des Aggerverbandes“<sup>22</sup> ergab auf Basis der Daten von automatischen Entlastungsmessungen im Zeitraum 2000 bis 2004 das in der folgenden Grafik dargestellte Ergebnis. Für das RÜB Eckenbach konnte zum Zeitpunkt der Berichtserstellung durch das IKT im Mai 2006 keine Aussage getroffen werden, da dieser Betriebspunkt erst im Jahr 2004 mit einem PDV-Anschluss ausgestattet wurde.

<sup>21</sup> Grenzwert NH<sub>3</sub>-N von 0,02 mg/l unter der Voraussetzung, dass das Gewässer morphologisch saniert ist

<sup>22</sup> IKT-Abschlussbericht: Wasserstandsmessungen an Regenbecken und Stauraumkanälen - Auswertung von Einstau- und Entlastungsereignissen am Beispiel des Aggerverbandes (Mai 2006)

Beurteilung der Überlaufdauer von Durchlaufbecken (DLB) und Fangbecken (FGB) nach IKT / Aggerverband 2006

**DLB**

sehr lang	>	530	h/a
lang		238 - 530	h/a
mittel		131 - 238	h/a
kurz		36 - 131	h/a
sehr kurz		0 - 36	h/a

**FGB**

sehr lang	>	219	h/a
lang		112 - 219	h/a
mittel		40 - 112	h/a
kurz		10 - 40	h/a
sehr kurz		0 - 10	h/a

RÜB Marienbergshausen  
Nicht im KANNST-Projekt  
„kurz“

RÜB Huppichteroth  
„mittel“

RÜB Kalkofen  
„mittel“

RÜB Talstraße  
„sehr lang“

RÜB Hast  
„mittel“

RÜB Rommelsdorf  
Inbetriebnahme Juni '06

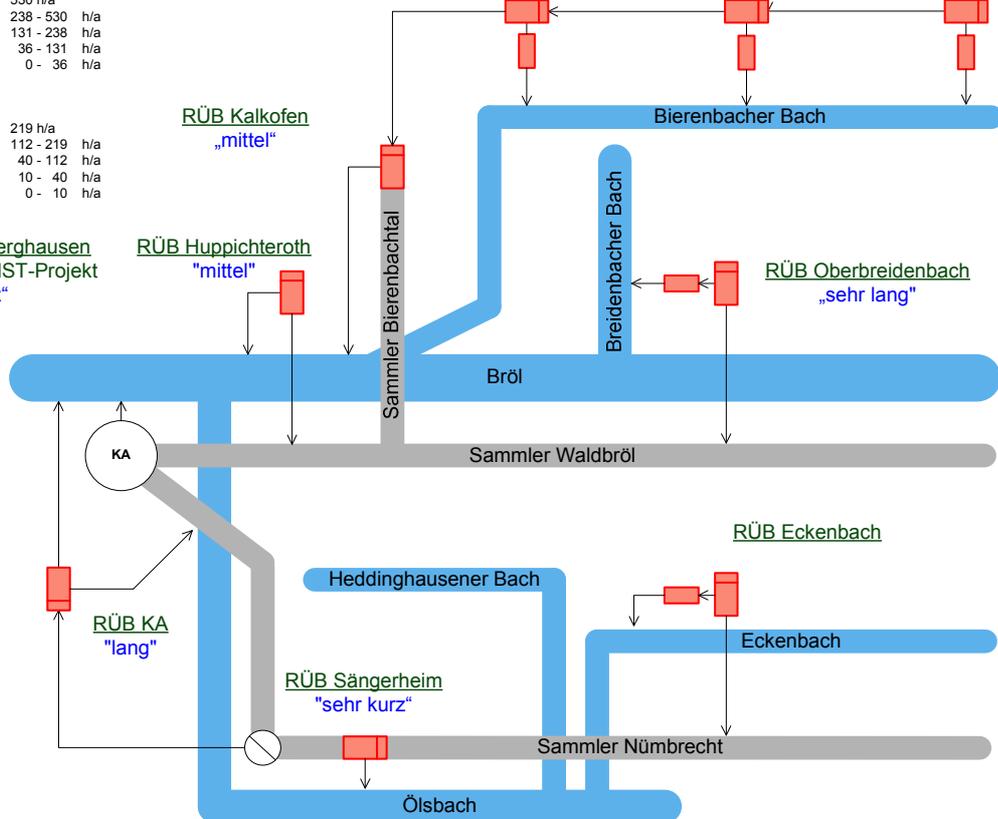


Abbildung 62: Regionalanalyse des Einzugsgebiets der KA Homburg-Bröl für den Zeitraum 2005 bis 2007

Nach der fortgeführten Regionalanalyse (2005-2007) wird ein weiterer Zeitraum hinsichtlich der Entlastungsdauern ausgewertet: Betrieb mit geregelterm Kanalnetz (2008-2010). Bei dieser zusätzlichen Auswertung wird wie bei der Regionalanalyse vorgegangen. Durch einen Vergleich der Ergebnisse der Regionalanalyse mit den Resultaten der zusätzlichen Auswertung lassen sich Entwicklungen erkennen, die auf die Einführung der Kanalnetzregelung zurückzuführen sind. Die folgenden beiden Balkendiagramme (Abb. 63 und 64) bilden die Überlaufaktivität innerhalb der genannten Zeitabschnitte in Form eines Rankings ab.

Innerhalb des Zeitraumes mit geregelterm Kanalnetz werden zusätzlich die RÜB Rommelsdorf und Kalkofen ausgewertet. Beide Becken sind hier durchgängig in Betrieb (Neubau RÜB Rommelsdorf, in Betrieb seit 06/2006, RÜB Kalkofen Wiederinbetriebnahme nach Umbau 12/2007).

Mit dem Betrieb des geregelten Kanalnetzes ist eine Verkürzung der Überlaufdauern bei allen Becken feststellbar. Die Volumina werden durch die intelligente Steuerung besser ausgenutzt. Besonders auffällig ist die wesentlich kürzere Überlaufdauer von RÜB Hast. Dies hat zwei Gründe. Zum einen wird die Messstelle aus dem Trennbauwerk in das RÜB verlegt, da hier die Beeinflussung der Messung durch Wellenbildung wesentlich geringer ist. Zum anderen ist das Becken mit Regelung regelmäßig fast vollständig gefüllt. Ohne Regelung hätte es hier schon zu einer Entlastung geführt. Die Kapazität des RÜB reicht also im geregelten Zustand sehr oft noch aus, ohne Regelung wäre es zu einer geringen Entlastungsmenge über einen längeren Zeitraum gekommen.

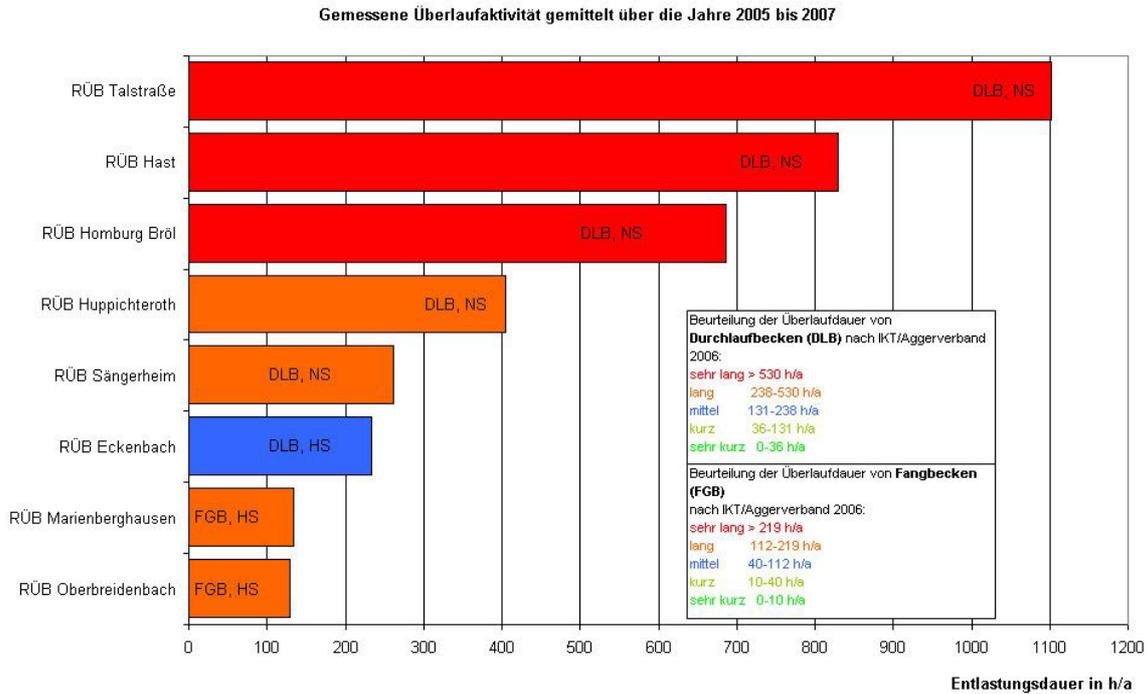


Abbildung 63: Ranking nach Entlastungsdauern (Mittelwert 2005 bis 2007)

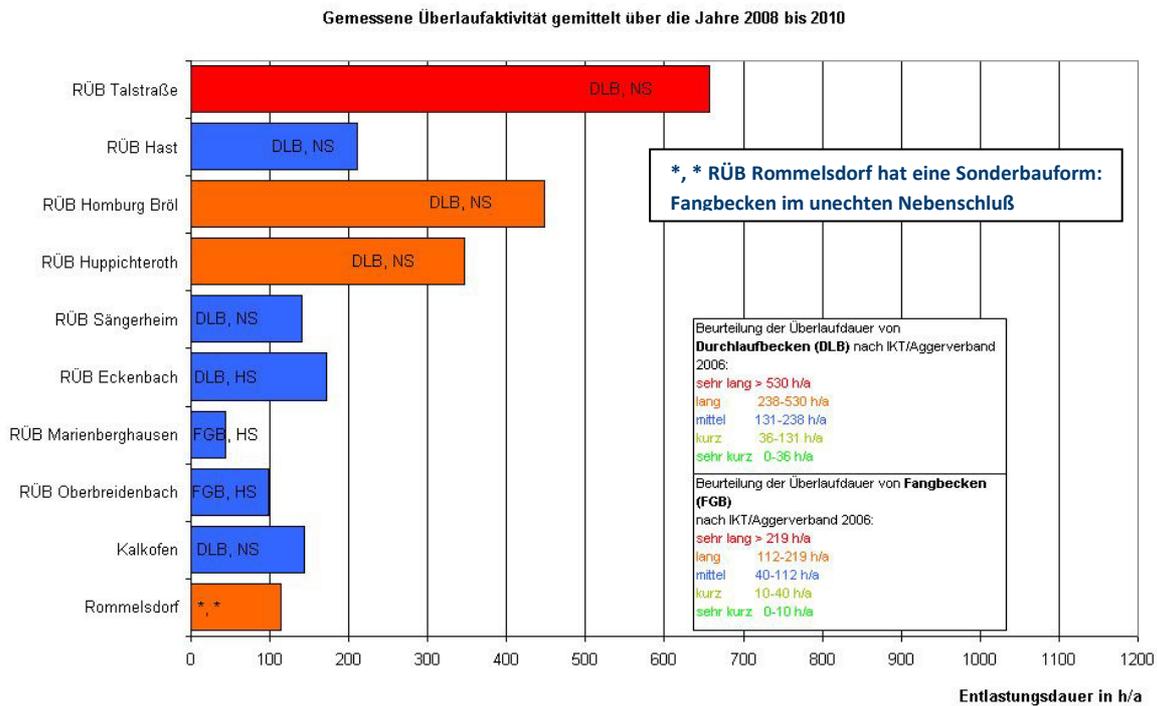


Abbildung 64: Ranking nach Entlastungsdauern (Mittelwert 2008 bis 2010, mit KANNST)

Wird wie in den beiden vorstehenden Grafiken nur die Entlastungsdauer betrachtet, deuten erste Hinweise auf überlastete Becken hin, z.B. durch Fremdwasser. Ohne Sicht auf die Entlastungsmengen ergibt sich jedoch kein vollständiges Bild.

## 7 Simulation Kläranlage<sup>23</sup>

Die Simulation der Kläranlage dient dazu, die ablaufenden komplexen biochemischen Prozesse der Abwasserreinigung abzubilden und zu analysieren, ohne dabei in die reale Anlage eingreifen zu müssen.

Die Kläranlage Homburg-Bröl ist auf 33.000 Einwohnerwerte ausgelegt und gehört zur Gruppe der „Mittelstädtischen Anlagen“. Sie ist geprägt durch ein eher ländliches Einzugsgebiet.

Der Kläranlagenzulauf beträgt bei Trockenwetter ca. 15.000 m<sup>3</sup>/d und bei Regenwetter bis 30.000 m<sup>3</sup>/d. Maximal zugelassen sind 33.264 m<sup>3</sup>/d, was einer Zulaufmenge von 385 l/s entspricht.

Ein Modell ist immer eine vereinfachte Abbildung der Wirklichkeit. Bei der Erstellung des Simulationsmodells der Kläranlage Homburg-Bröl wird auf hohe Detailtreue geachtet, um alle Anlagenteile und Verfahrensschritte so realitätsnah wie möglich darzustellen. Ein Fließschema der Kläranlage in Abbildung 65 zeigt die Wasserwege der Abwasserbehandlung. Im Modell wurde die Anlage ab dem KA Zulauf abgebildet. Das Regenüberlaufbecken wird in dieser KA Simulation nicht betrachtet, da es in die Kanalnetzsimulation eingeht.

Der Bereich der Schlammbehandlung wird für die Betrachtungen im KANNST Projekt vorerst nicht benötigt und geht ebenfalls nicht in die KA Simulation mit ein.

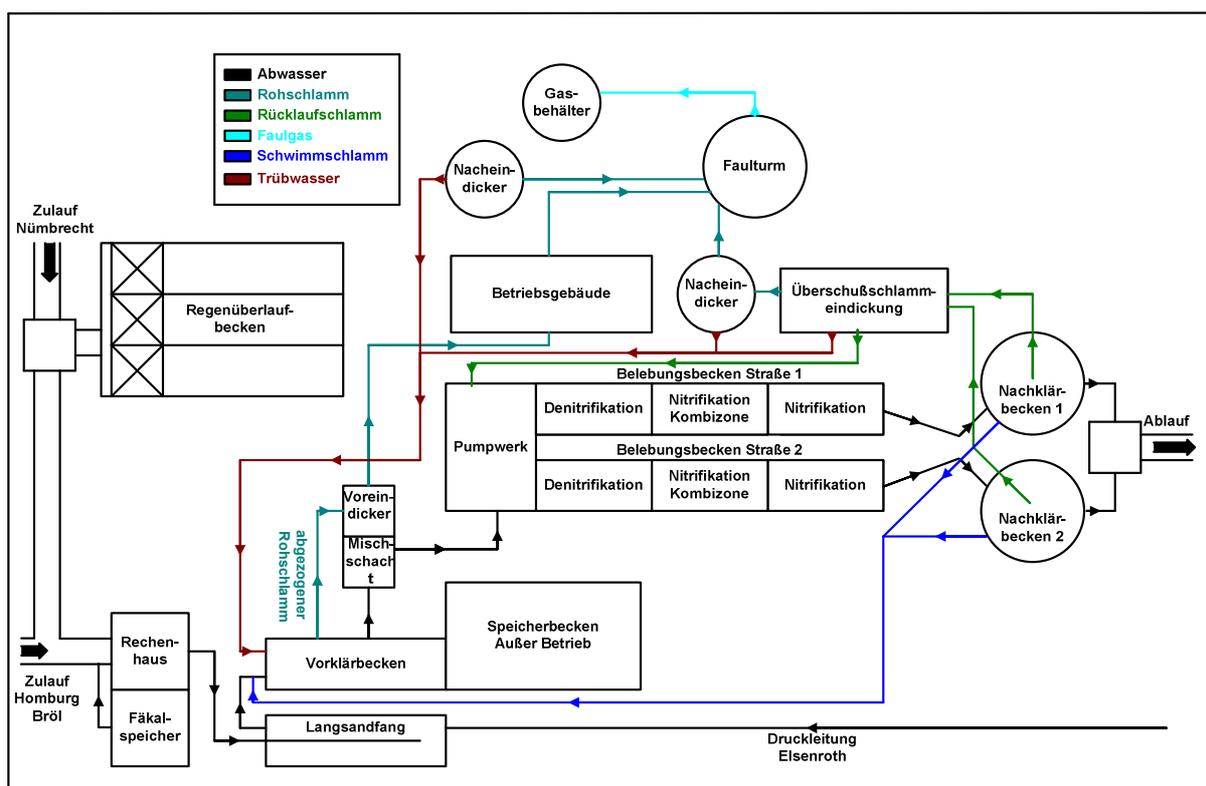


Abbildung 65: Fließbild-Schema KA Homburg-Bröl

Im weiteren Verlauf werden reale und simulierte Anlagenteile gegenübergestellt und erläutert. Für eine bessere Orientierung wird das Fließbild-Schema der KA Homburg-Bröl in der folgenden Abbil-

<sup>23</sup> Quelle: „Wasser in der Gesellschaft“, T. Haag

dung vereinfacht und zeigt im weiteren Verlauf, an welcher Stelle sich die beschriebenen Objekte befinden.

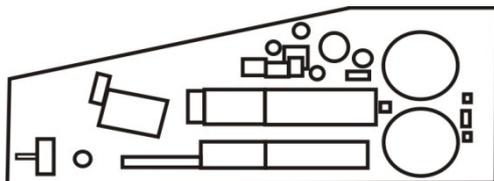


Abbildung 66: Vereinfachter Lageplan

Als Einstieg in das KA Modell wird eine Gesamtübersicht des Kläranlagenmodells vorgestellt, wie es im KANNST Projekt umgesetzt ist.

Die Abbildung 67 zeigt den allgemeinen Modellaufbau in der Simulationssoftware SIMBA®.

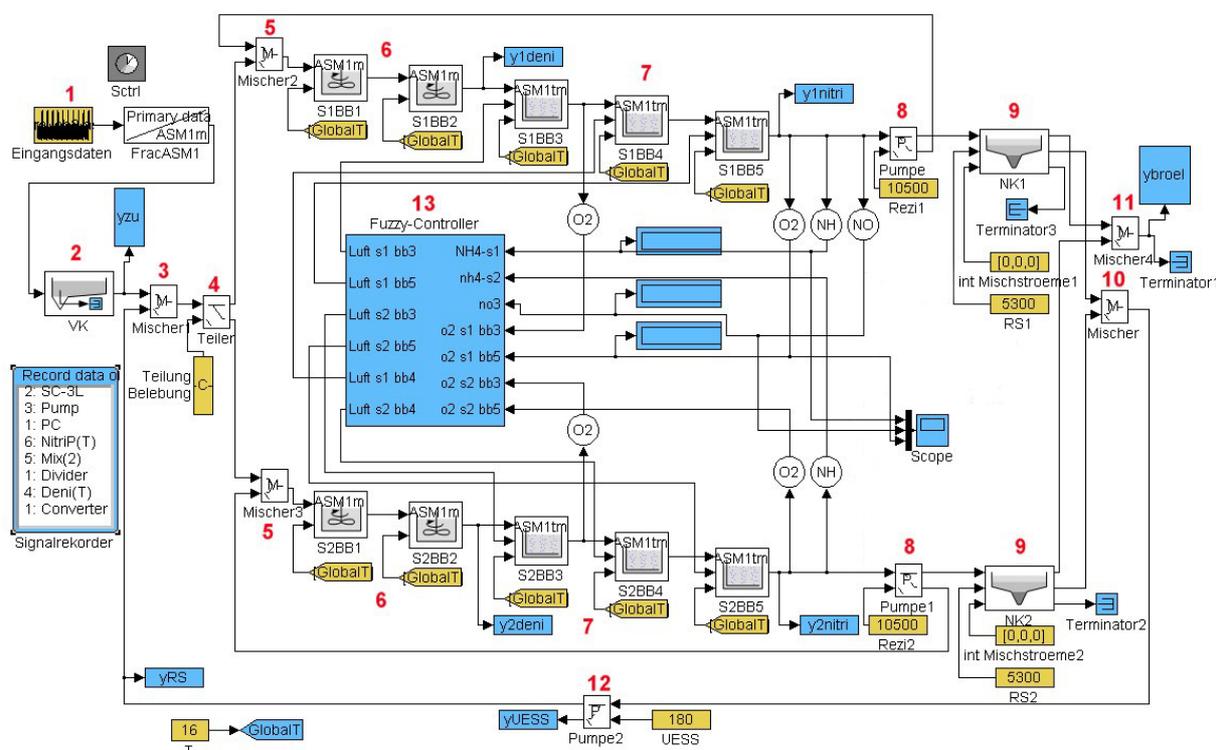
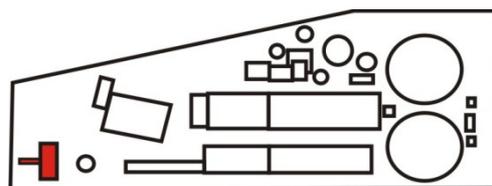


Abbildung 67: Modell der KA Homburg-Bröl in SIMBA®

Die einzelnen Modellbestandteile (Station 1 bis 12) werden im Folgenden erklärt. Für das gesamte Modell wird auf Grundlage realer Messdaten eine globale Temperatur von 16°C festgelegt.

### Kläranlagenzulauf

Nach dem Zulauf (Station 1 in Abbildung 67) befindet sich vor dem Rechenhaus ein Fäkalspeicher mit einem Fassungsvermögen von 70 m<sup>3</sup>, dessen Fäkalien dem Abwasser zugemischt werden können.



Im Rechenhaus wird Rohabwasser durch einen Rechen mechanisch gereinigt.

Die Simulation beginnt hinter dem Sandfang. An dieser Stelle werden auch Daten im Rahmen zweier Messkampagnen (2005 und 2006) aufgenommen. Sie dienen als Eingangsdatenbank für das Modell in SIMBA®.

Gemessen werden die Parameter:

- CSB (chemischer Sauerstoffbedarf)
- NH<sub>4</sub>-N (Ammoniumstickstoff)
- NO<sub>3</sub>-N (Nitrat-Stickstoff)
- Q (Zulaufmenge, gemessen über Q<sub>ab</sub>)
- PO<sub>4</sub>-P (Ortho-Phosphat)



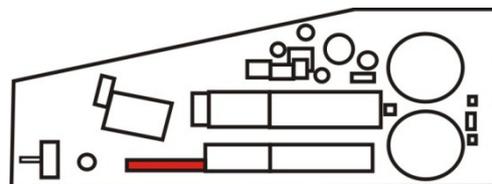
Abbildung 68: KA Zulauf

Hinterlegt werden die Messungen als 3-Minuten-Werte. SIMBA® benötigt als Stickstoffeingangswert den TKN (Kjeldahl-Stickstoff<sup>24</sup>).

Da dieser nur mit sehr großem technischen Aufwand messbar ist, wird er aus dem leicht zu ermittelnden Ammoniumstickstoff berechnet. Der Zusammenhang zwischen TKN und Ammoniumstickstoff ist abhängig von der Abwasserzusammensetzung und wird daher in einer Messkampagne für das hier vorliegende Abwasser mit einem Verhältnis TKN/Ammoniumstickstoff = 1,2 ermittelt. In einem Eingangsblock sind die KA Zulaufdaten zur Simulation hinterlegt. Ein an die Eingangsdaten angeschlossener Block (FracASM1) fraktioniert die vier Summenparameter (Q, TKN, P<sub>ges</sub>, CSB) in die 14 Stoffgruppen des Belebtschlammmodells ASM1 [IFAK 2001]. Das Phosphat wird für das ASM1 nicht berücksichtigt und entfällt für weitere Betrachtungen.

### Sandfang und Vorklärbecken

Nach der mechanischen Reinigung durch den Rechen fließt das Abwasser durch einen Langsandfang (Abbildung 69). In den Sandfang wird separat mechanisch vorgereinigtes Abwasser aus der Druckleitung der Pumpstation Elsenroth eingeleitet und findet damit auch Berücksichtigung. Im Laufe des Projektes wird die Einleitungsstelle „PW Elsenroth“ vor den Rechen verlegt. Dies wird bei der weiteren Betrachtung beachtet.



<sup>24</sup> Kjeldahl-Stickstoff ist die Konzentration an Gesamt-Stickstoff als Summe aus organisch gebundenem Stickstoff und Ammoniumstickstoff; TKN = Norg. + NH<sub>4</sub>-N; [mg/L]

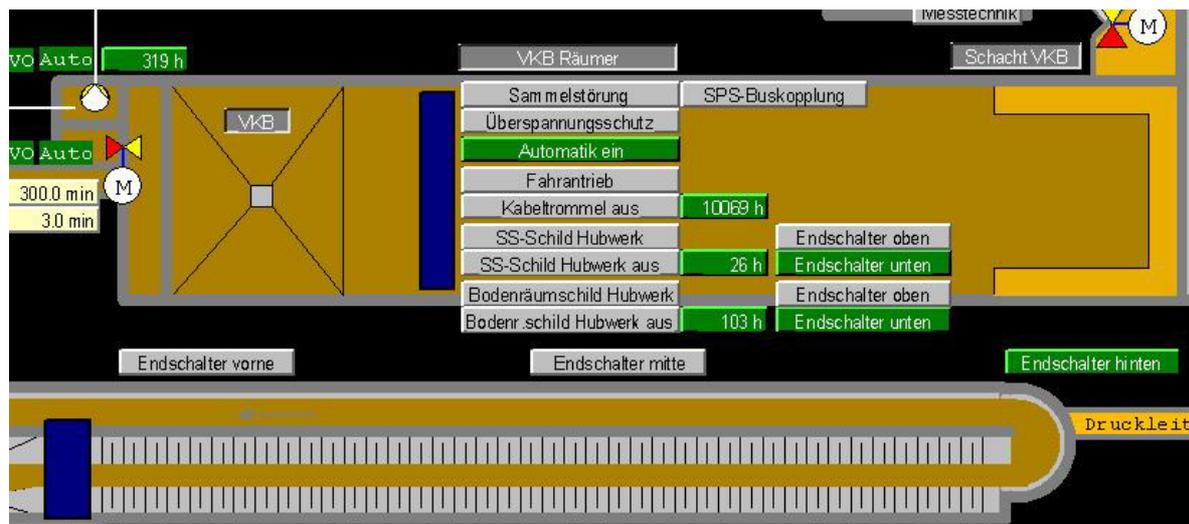


Abbildung 69: Sandfang und Vorklärbecken, Prozessbild aus der PDV [Quelle: Aggerverband]

Danach folgt das Vorklärbecken (VKB) mit einem Volumen von 363 m<sup>3</sup> (Abbildung 70).

Der dort abgezogene Rohschlamm wird direkt in den Voreindicker und von dort über einen Schacht in den Faulturm gepumpt.

Die Vorklärung wird durch ein vereinfachtes Vorklärmodell in SIMBA<sup>®</sup> dargestellt (Station 2 in Abbildung 67).

In diesem SIMBA-Reaktor findet nur eine mechanische Reinigung (Absetzvorgänge) statt. Biologische Vorgänge werden in der Simulation nicht berücksichtigt, da sie in diesem Anlagenteil von sehr geringer Bedeutung sind. Eingang der Vorklärung ist das Rohabwasser, Ausgang ist das vorgeklärte Abwasser.

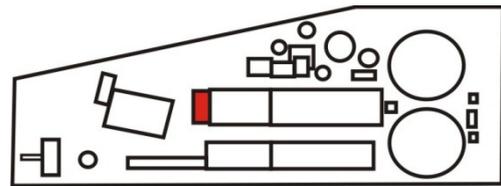
Abbildung 70: VKB KA Homburg-Bröl



## Zwischenpumpwerk

Aus dem Vorklärbecken wird das Abwasser über das Zwischenpumpwerk in die Belebung gepumpt.

Das Pumpwerk (Abbildung 72) ist in zwei Bereiche eingeteilt



(Abbildung 71): Einen für den Rücklaufschlamm und einen für das Rohabwasser.

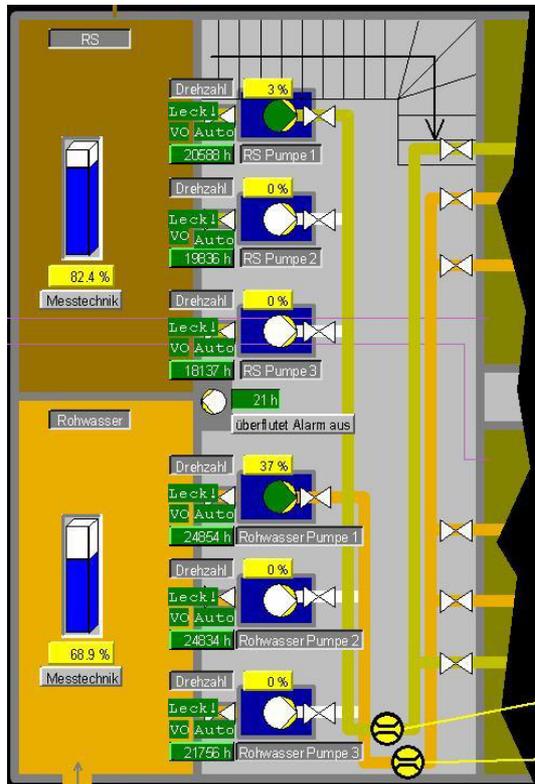


Abbildung 71: Pumpwerk, PDV [QUELLE: AGGERVERBAND]

Das Rohabwasser kommt aus dem Vorklärbecken und wird in die Belebung gepumpt. Der Rücklaufschlamm fließt im natürlichen Gefälle aus der Nachklärung zum Zwischenpumpwerk und wird dort wieder in die Belebung geleitet. In der Simulation werden diese Elemente dargestellt durch Mischer (Station 3) für das vorgeklärte Abwasser und den Rücklaufschlamm, sowie Teiler (Station 4), die das Abwasser-Rücklaufschlamm-Gemisch in die Belebungsbecken (BB) bzw. Belebungsstraßen 1 und 2 gleichmäßig aufteilen.

Der aus den beiden Nachklärbecken zufließende Rücklaufschlamm wird mit dem aus der Vorklärung zufließenden Abwasser vermischt.

Ein weiterer Mischer (Station 5) wird in SIMBA benötigt für den vorher auf die Belebungsstraßen aufgeteilten Abwasserstrom.

Der wird dem internen Rezirkulations-Volumenstrom (Rezi) beigemischt. Diese SIMBA-Blöcke sind für beide Belebungsstraßen identisch. Durch eine Pumpe (Station 12) mit einer konstanten Leistung von 180 m<sup>3</sup>/d wird aus dem Rücklaufschlamm-Volumenstrom der Überschussschlamm entnommen. Dieser wird dem Simulationssystem komplett entzogen und hier nicht weiter betrachtet.



Abbildung 72: Pumpwerk

## Belebungsstraßen

Die Belebung (Abbildung 73) setzt sich aus zwei parallel beschickten, längs durchströmten Becken mit je 3.500 m<sup>3</sup> Rauminhalt zusammen. Beide Belebungsbecken besitzen einen vorgeschalteten Denitrifikationsanteil von ca. 30 % und einen nachgeschalteten Nitrifikationsanteil. Die Denitrifikation dient der Reduktion der Nitrate und die Nitrifikation der Oxidation des Ammonium-Stickstoffs.

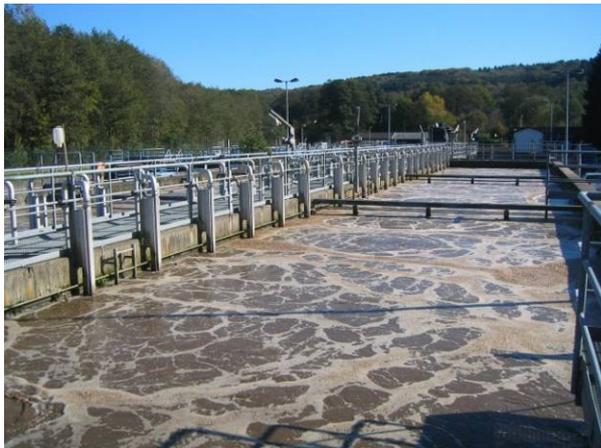
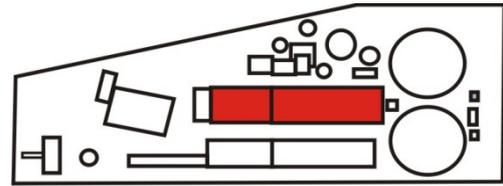


Abbildung 73: Belebungsstraßen der KA

Durch einen „variablen“ Beckenabschnitt kann das Denitrifikationsvolumen im Bedarfsfall vergrößert werden. In der Denitrifikation werden das zufließende Abwasser, Rücklaufschlamm (ein externer Kreislauf über Rücklaufschlamm-pumpen) und nitrathaltiger belebter Schlamm (ein interner Kreislauf über Rezirkulations-pumpen) zusammengeführt. Das Belebungsbecken besitzt keine exakt voneinander getrennten Schlammkreisläufe.

## Denitrifikationszone (Station 6)

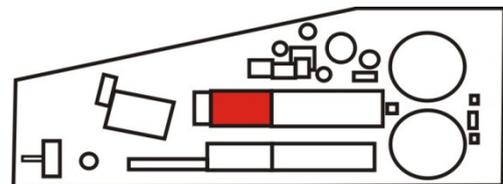
Die Denitrifikationszone ist für beide Belebungsstraßen identisch.

Straße 1 und Straße 2 werden in der Simulation parallel



Abbildung 74: Denitrifikationsbecken

modelliert und jede Denitrifikationszone ist



mit zwei Rührwerken ausgestattet. Die einzelnen Denitrifikations-Reaktoren (625,5 m<sup>3</sup>) werden vollständig durchmischt. Daraus entsteht für jede Straße ein Denitrifikationsvolumen von 1.251 m<sup>3</sup>.

Die Denitrifikations-Reaktoren werden simuliert mit dem Belebtschlammmodell ASM1 (modifiziert) mit 13 Stoffgruppen.

## Nitrifikationszone (Station 7)

Die Nitrifikationszone wird durch Belüfterstränge mit dem notwendigen Sauerstoff versorgt. Die Belüfterstränge sind mit Membranplatten-Belüftern bestückt (Abbildung 75).

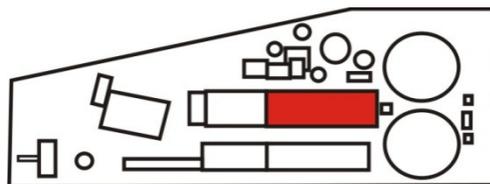


Abbildung 75: Membran-Belüftungsplatte aus dem Belebungsbecken

Die Nitrifikationsbereiche beider Belebungsstraßen sind in der Simulation identisch aufgebaut und in jeweils drei Nitrifikationsbecken unterteilt. Das erste und das letzte Becken sind reine Nitrifikationsbecken nach ASM1 mit Sauerstoffeintrag durch Druckbelüftung. Sie sind auf ein Volumen von je 812 m<sup>3</sup> ausgelegt. Das zweite Becken ist eine Kombizone (belüftete und unbelüftete Phasen) mit einem Volumen von 625 m<sup>3</sup>. Wie zurzeit auf der realen Kläranlage wird dieses Becken in der Simulation als reines Nitrifikationsbecken gefahren. Insgesamt stehen somit pro Straße 2.249 m<sup>3</sup> Beckenvolumen der Nitrifikation zur Verfügung. Die Belüftungselemente der Druckbelüftung befinden sich 7 Meter unter dem Wasserspiegel. Eingänge dieser vollständig durchmischten Reaktoren sind zum einen die Abwasserströme sowie die eingetragenen Luftvolumenströme in [m<sup>3</sup>/d]. Der Luftvolumenstrom wird durch einen Regler vorgegeben. Am Ende des Belebungsbeckens befindet sich eine Pumpe (Station 8). Diese ist für die Rezirkulation zuständig und befördert einen konstanten Rezirkulations-Volumenstrom von 10.500 m<sup>3</sup>/d in den vorgeschalteten Mischer zur Denitrifikation zurück.



### Nachklärung und Ablauf

Das Abwasser-Schlamm-Gemisch wird im Ablauf der Belebungsstraßen über einen getrennten Schacht auf die Nachklärbecken (NKB) 1 und 2 (Abbildung 76) mit je 3.523m<sup>3</sup> Volumen geführt.

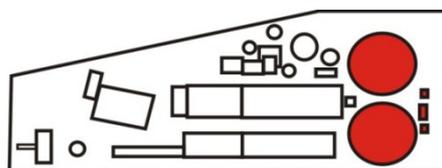


Abbildung 76: Eines von zwei Nachklärbecken der KA Homburg-Bröl

Neben dem abgesetzten Rücklaufschlamm, kann auf der Oberfläche der Nachklärung Schwimmschlamm auftreten. Dieser gelangt über eine Leitung wieder in das Vorklärbecken.

In der Simulation fließen die Abwasserströme der beiden Belebungsstraßen jeweils in zwei baugleiche Nachklärbecken. Es handelt sich dabei um 3-Schichten Modelle, in denen Sinkgeschwindigkeit und biologische Prozesse nachgebildet werden können (Station 9). Eingänge der

Reaktoren sind der Abwasservolumenstrom und die Vorgabe des Rücklaufschlammabzugs. Dieser ist mit konstant 5.300 m<sup>3</sup>/d pro Nachklärbecken vorgegeben.

Ausgänge sind das geklärte Abwasser, welches durch einen Terminator aus dem System entnommen wird (entspricht dem Ablauf zum Gewässer) und der Rücklaufschlammvolumenstrom (Station 10).

Das gereinigte Wasser wird aus den beiden Nachklärbecken miteinander vermischt (Station 11) und in den Bröl-Bach (Abbildung 77) geleitet.



Abbildung 77: Das Gewässer - der Brölbach

## 7.1 Fuzzy<sup>25</sup>-Regelung

Hinter dem Block Fuzzy-Controller (Station 13, Abbildung 78) steht der Fuzzy-Regler, durch den die Luftvolumenströme (Sauerstoffeintrag) der einzelnen Nitrifikationsbecken berechnet und vorgegeben werden.

Auf der realen KA Homburg-Bröl weisen die Belebungsstraßen unterschiedliche Belastungen auf. Dies wird durch eine nicht ganz exakte Teilung des Zulaufstroms auf die zwei Straßen verursacht, die wegen der nicht symmetrisch ausgelegten Zulaufsituation mit Handschiebern nicht exakt eingestellt werden kann. In der Simulation hingegen verteilt sich der Volumenstrom symmetrisch auf die beiden Straßen. Am Ablauf jeder Belebungsstraße wird in der Realität O<sub>2</sub> und NH<sub>4</sub>-N sowie in Straße 1 die Konzentration an NO<sub>3</sub>-N gemessen. Diese Größen gehen in den Fuzzy-Regler ein. Zentraler Teil dieses Bausteins ist der Fuzzy-

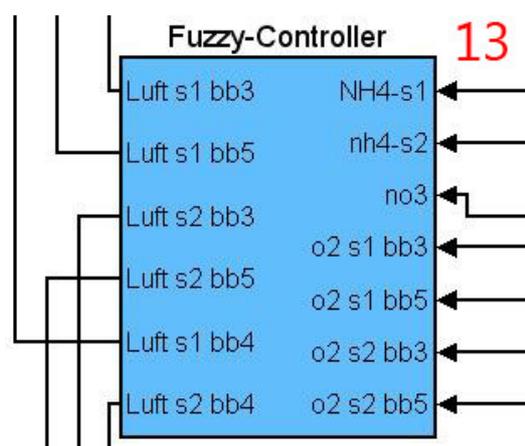


Abbildung 78: Fuzzy Block in SIMBA®

Regler zur Sauerstoffregelung in den Belebungsbecken. Bei der Umsetzung wird darauf geachtet, den Regler exakt nach den Vorgaben des realen Reglers zu modellieren. Alle Regeln werden übernommen und die Ein- bzw. Ausgänge sind unverändert implementiert (Tabelle 7). Durch die unterschiedliche hydraulische Zulaufbelastung der Straßen 1 und 2 verursacht der Fuzzy-Regler in der Realität unterschiedliche Betriebsweisen für die einzelnen Belebungsbecken. Dies ist auf der realen KA sinnvoll, um hydraulische Unregelmäßigkeiten auszugleichen. In der Simulation führt dies bei einer symmetrischen Aufteilung des Zulaufstroms in das BB zu einem ungleichen Verhalten (siehe hierzu auch Abbildung 79 und Abbildung 80).

<sup>25</sup> Fuzzy kommt aus der englischen Sprache und bedeutet „unscharf“

**Tabelle 7: Eingangsparameter und Messstellen des Fuzzy-Reglers**

Eingangsparameter Fuzzy-Regler	Messstelle			
	Ablauf BB3 S1	Ablauf BB3 S2	Ablauf BB5 S1	Ablauf BB5 S2
O <sub>2</sub>	X	X	X	X
NH <sub>4</sub> -N			X	X
NO <sub>3</sub> -N			X	

## 7.2 Ergebnisse der Kläranlagen-Simulation

In SIMBA® wird die Kläranlage mit einem Standardtagesgang (für 100 Tage) angepasst an die Einwohnerwerte der KA Hamburg-Bröl, simuliert und die Anlage somit „eingefahren“. Dieser Zustand wird für die weiteren Untersuchungen als Ausgang festgehalten. Die in diesem Kapitel vorgestellten Ergebnisse beziehen sich auf ein Simulationsmodell, das nach den 100 Tagen weitere 20 Tage mit real gemessenen Daten aus der Messkampagne 2006 und 2007 simuliert und validiert wird.

Zur Einordnung der Ergebnisse sind in der Tabelle 8 die aktuellen Ablauf-Grenzwerte für die Kläranlage Homburg-Bröl aufgeführt.

**Tabelle 8: Überwachungswerte Homburg-Bröl, Ablauf**

Parameter	Überwachungswerte	Angestrebter Ablaufkonzentrationsbereich
NH <sub>4</sub> -N	3 mg/l für T > 6°C	1,25 mg/l
NO <sub>3</sub> -N		3 – 15 mg/l
N <sub>anorg</sub>	18 mg/l für T > 12°C	

### 7.2.1 Auswertung der Sankey-Diagramme

Die Sankey-Diagramme dienen der Darstellung von Massen- und Stoffflüssen in komplexen Prozessen. Sie stellen den relativen Wert eines (Stoff-) Flusses über die Breite der entsprechenden Linien im Diagramm dar. Sie sind eine erste, visuelle Kontrollstufe für die Prozesse im Modell.

Anhand der Flussdiagramme lassen sich die Verteilung der Stoffströme, die Rückführungen sowie die Abbauleistungen der beiden Straßen erkennen. Als aussagekräftige und relevante Abwasser-Parameter werden beispielhaft der Massenfluss von Ammonium-Stickstoff und Nitrat-Stickstoff im Kreislauf der KA betrachtet.

Der Ammonium-Stickstoff gelangt aus dem Kanalnetz in den Zulauf der KA. Er wird in der Oxidationsphase im Nitrifikationsbereich (S1BB1-BB3, S2BB1-BB3) mit Hilfe des Sauerstoffs zu Nitrat-Stickstoff abgebaut (Abbildung 79).

Die relative Abbaurrate, bezogen auf die Gesamtmenge, ist in den zwei Straßen unterschiedlich (Konzentrationen am Ausgang der Straßen: 5 % und 22 %). Dies liegt an der differenzierten Fahrweise von Straße 1 und 2. Im Regler wird der Sauerstoffgehalt in den beiden Straßen nicht gleich gewichtet.

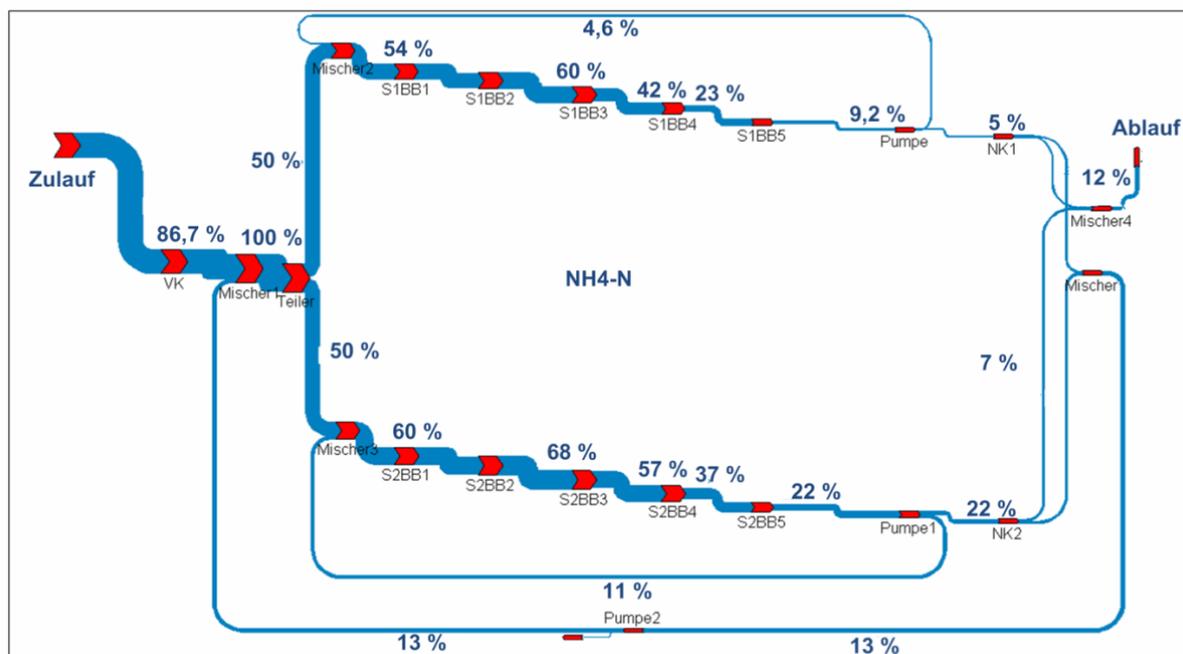


Abbildung 79: Massenverteilung des Ammoniumstickstoffs in der KA

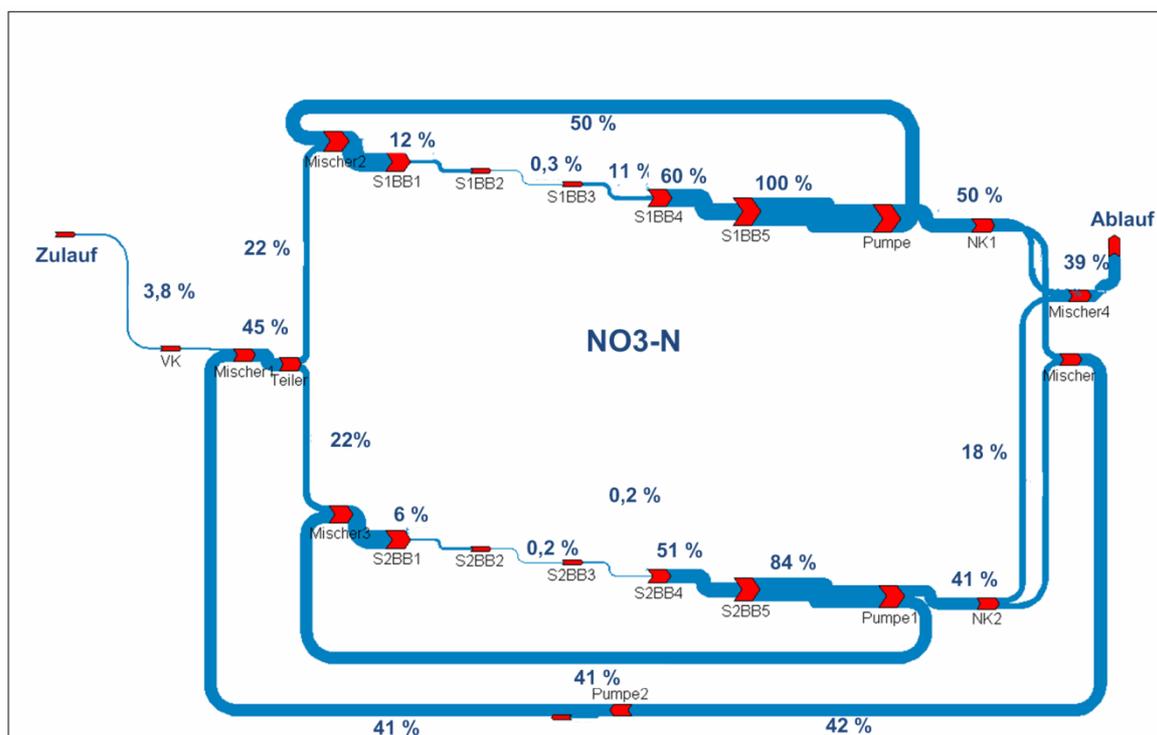


Abbildung 80: Massenverteilung des Nitrat-Stickstoffs in der KA

Der Nitrat-Stickstoff (Abbildung 80) bildet sich maßgeblich erst in der Oxidationsphase im Nitrifikationsbereich (S1BB4+BB5, S2BB4+BB5). Der interne Rezirkulationsstrom (mit 50% und 41%) fördert das

NO<sub>3</sub>-N wieder in die Denitrifikationsbecken, wo es in der sauerstoffarmen Zone bis auf 0,2 % bzw. 0,3 % reduziert werden kann (S1BB1-BB3, S2BB1-BB3).

Auch hier ist die leicht unterschiedliche Verfahrensweise der Regelung zu erkennen, die durch den idealisierten Zustand in der Simulation deutlich wird.

Die beschriebenen Ungleichmäßigkeiten in der Verteilung machen es notwendig, die beiden Straßen unterschiedlich zu regeln, um für beide Straßen in etwa gleiche Ablaufkonzentrationen zu erreichen.

Es kann in der Zukunft sinnvoll sein, die Fuzzy-Regelung in der Simulation anzupassen, um gleiche Bedingungen für die Straßen 1 + 2 zu schaffen, da die ungleiche hydraulische Verteilung auf der KA Homburg-Bröl im Modell nicht abbildbar ist. Für die Simulation des Gesamtsystems würde sich ein realistischeres Bild des Kläranlagen-Optimierungspotenzials ergeben. Die Sankey-Diagramme zeigen einen ersten Einblick in die biologischen Abläufe der KA und wie sich die Massenströme bei einer Kläranlage mit vorgeschalteter Denitrifikation verhalten. In einem weiteren Schritt wird die Qualität der Simulation an der Validierung mit Messdaten beurteilt.

## 7.2.2 Ergebnisse

Diese Ergebnisse entstammen der beschriebenen Simulation.

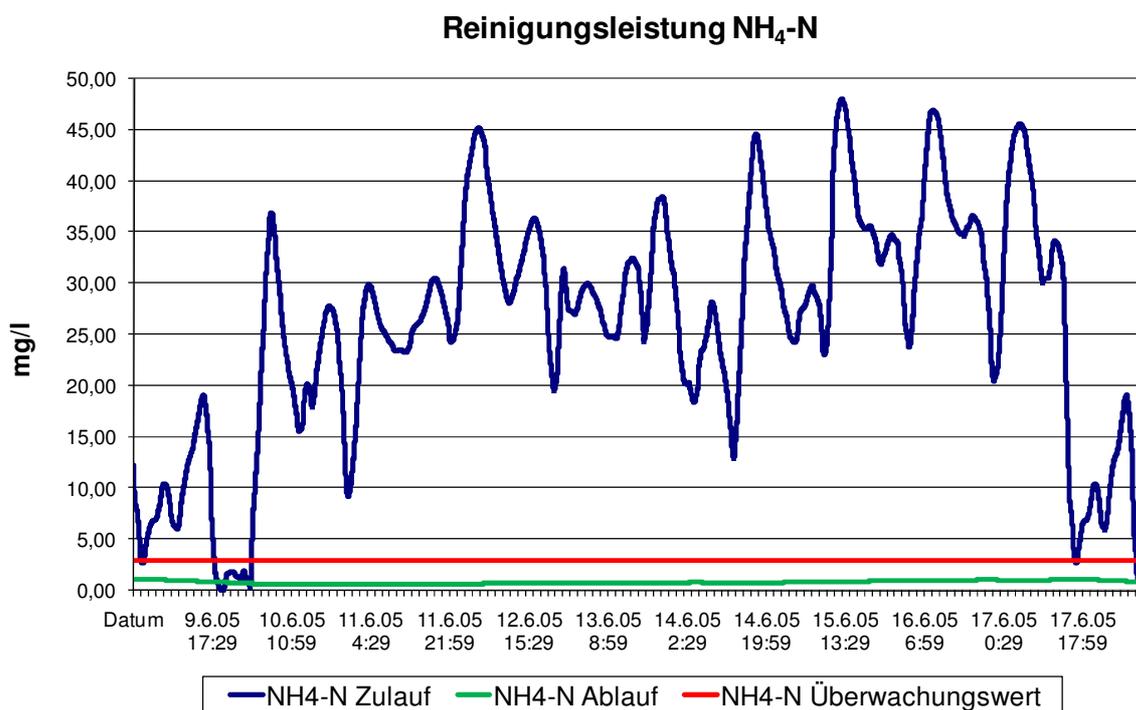
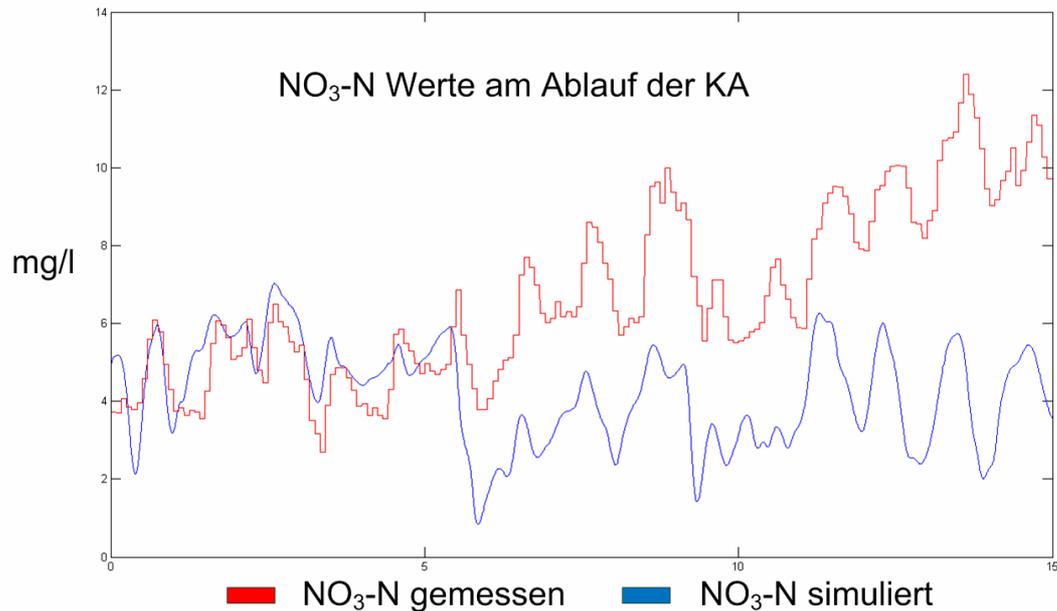


Abbildung 81: Ammonium im Zu- und Ablauf der Kläranlage Homburg-Bröl

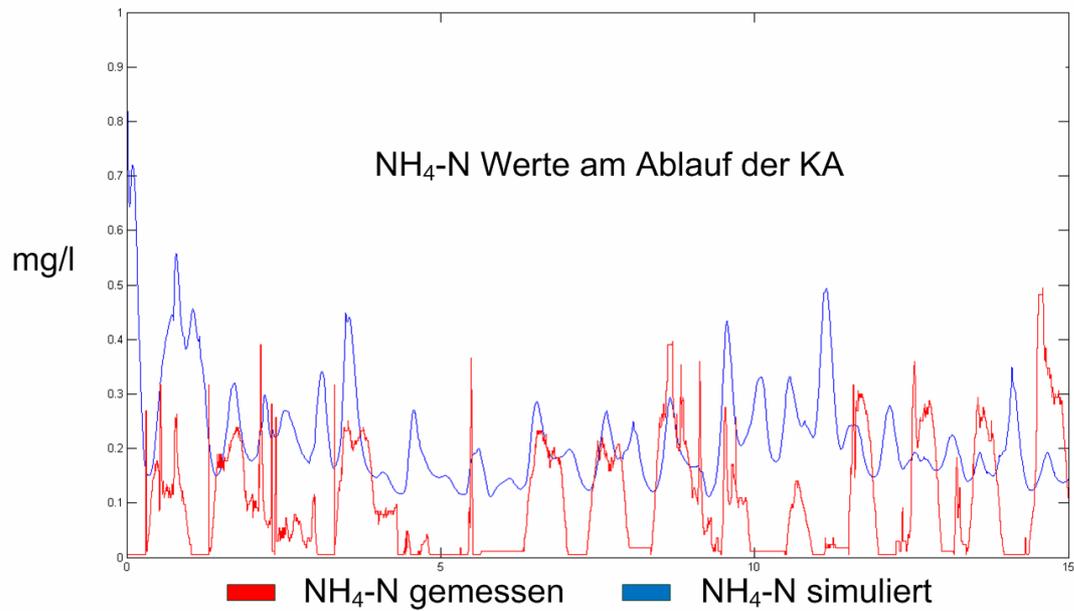
In den Zulaufdaten sind vom 09.06.-17.06.2005 NH<sub>4</sub>-N Werte zwischen 20 und 50 mg/l enthalten. Diese Ammonium-Stickstoff-Angaben stammen aus der Messkampagne am Zulauf der KA im Juni 2005. In Abbildung 81 ist der deutliche NH<sub>4</sub>-N Abbau zu erkennen. Im Ablauf können in Übereinstimmung mit den Messungen Werte simuliert werden, die unterhalb des Überwachungswertes von 3 mg/l liegen.

Da die Einhaltung der Ablaufgrenzwerte für die Optimierung der KA ein wesentliches Kriterium ist, werden an dieser Stelle noch zwei Auswertungen von  $\text{NH}_4\text{-N}$  und  $\text{NO}_3\text{-N}$  im Ablauf gezeigt. Es werden gemessene Daten den simulierten Daten über einen Zeitraum von 15 Tagen gegenüber gestellt.



**Abbildung 82: Nitrat-Stickstoffwerte am Ablauf der KA**

In Abbildung 82 liegen die simulierten  $\text{NO}_3\text{-N}$  Daten weit unterhalb der Bemessungsgrenze von max. 15mg/l. Die gemessenen Referenzdaten steigen ab dem sechsten Tag an, was durch eine Drift des Messwertes im Messgerät verursacht wurde. Das Gerät wurde erst nach Abschluss der Messkampagne gewartet und somit auch erst dann der Messfehler behoben. Üblicherweise schwankt der  $\text{NO}_3\text{-N}$ -Wert um vier bis sechs mg/l, wie es für die ersten fünf Tage zu erkennen ist. Damit wird die Dynamik der Kläranlage auch im Modell gut abgebildet. Die gemessenen und simulierten Werte zeigen ein ähnliches Verhalten.



**Abbildung 83: Ammoniumstickstoff-Werte am Ablauf der KA**

Ein Vergleich der Simulation mit den Messwerten für Ammonium-Stickstoff zeigt ebenfalls gute Ergebnisse, wie in Abbildung 83 zu erkennen ist. Der Verlauf des simulierten  $\text{NH}_4\text{-N}$  gleicht den originalen Messdaten. Die Werte liegen ebenfalls weit unter der Bemessungsgrenze von 3 mg/l.

## 8 Simulation Kanalnetz<sup>26</sup>

Die Kanalnetzsimulation ist ein wichtiger Teil des KANNST Projekts und der technische Schwerpunkt der Forschung in dieser vorliegenden Arbeit. Die Zielsetzung lag auf der Beantwortung der Frage: „Unter welchen Bedingungen ist es möglich, ein vollständiges kommunales Kanalisationssystem zu simulieren und es für den Entwurf und die Optimierung eines integrierten Regelungskonzeptes zu verwenden, mit dem Ziel die Gewässerbelastung zu reduzieren?“

Der Anspruch auf eine möglichst vollständige Simulation stellt hierbei hohe Anforderungen. Häufig werden Kanalnetze nur in einer vereinfachten Form für die Simulation modelliert, mehrere Haltungen werden zu einer zusammengefasst oder es werden nur Teilabschnitte betrachtet. Denn die Simulation aller im Netz befindlichen Haltungen und Schächte (oft mehrere Tausend), ist mit viel Arbeitsaufwand, einem hohen Datenaufkommen und einem extrem hohen Rechenaufwand verbunden.

Für die Modellierung des Homburg-Bröl Gebiets war von der Aufsichtsbehörde eine vollständige Abbildung des kommunalen Kanalisationssystems gefordert.

Im Folgenden werden die Arbeiten, die Ergebnisse und die dafür notwendigen Forschungsschritte erläutert, die in Verbindung mit der Kanalnetzsimulation durchgeführt wurden.

### 8.1 Ausgangsdaten des Kanalnetzes

Diese Daten dienen dem besseren Verständnis und der Erläuterung der Ausgangssituation des Kanalnetzes im KANNST Projekt.

Die Angaben in Tabelle 9 zeigen das vorhandene Volumen und damit die hydraulische Aufnahmekapazität der Bauwerke im Netz. Die Drosselmengen sind die zu Beginn der Forschung fest eingestellten und genehmigten Obergrenzen der Durchflussmengen an den RÜB. Diese Drosselmengen sollen später in der Abflussregelung variabel eingestellt und ggf. sogar erhöht werden. Dazu ist eine Genehmigung der BZR Köln notwendig. Die Simulation bietet eine Grundlage für die Dokumentation der Ergebnisse und eine Beweisführung für den Erfolg der Strategie.

Tabelle 9: Wichtige Daten der RÜB im Kanalnetz Homburg-Bröl in der Übersicht

RÜB	Volumen [m <sup>3</sup> ]	Drosselmenge [l/s]	Beckentyp
Eckenbach	1.055	41	DLB, HS
Sängerheim	1.060	75	DLB, NS
Hast	Becken: 688 SK: 122	20	DLB, NS
Talstraße	535	40	DLB, NS
Kalkofen	Becken: 408 SK: 140	60	DLB, NS
Oberbreidenbach	219	15	FGB, HS
Huppicheroth	90	15	SKU, NS
Marienberghausen	300	10	FGB, HS

<sup>26</sup> Quelle: „Wasser in der Gesellschaft“, T. Haag

<b>Kläranlage</b>	1.175	85	DLB, NS
<b>Rommelsdorf</b>	Becken: 460 Kanal: 50	15	FGB, NS
<b>Summe</b>	<b>6.302 m<sup>3</sup></b>		

Der Beckentyp Nebenschluss bzw. Hauptschluss besagt, ob das Becken direkt im Hauptstrang des Kanals integriert und stetig durchströmt wird oder ob es neben dem Abwasserfluss angelegt ist.

Erläuterung zur Tabelle:

- DLB: Durchlaufbecken
- FGB: Fangbecken
- SK: Stauraumkanal
- SKU: Stauraumkanal mit unten liegender Entlastung
- HS: Hauptschluss
- NS: Nebenschluss

Wichtige Voraussetzung für das Verständnis des Kanalnetz-Modells in der Simulation ist die Kenntnis über die hydraulische Verknüpfung der RÜB in den Strängen Waldbröl und Nüm-brecht. Die folgende Darstellung zeigt alle Becken im Kanalnetz, die mit Motorschiebern ausgestattet sind und für die Abflussregelung zur Verfügung stehen.

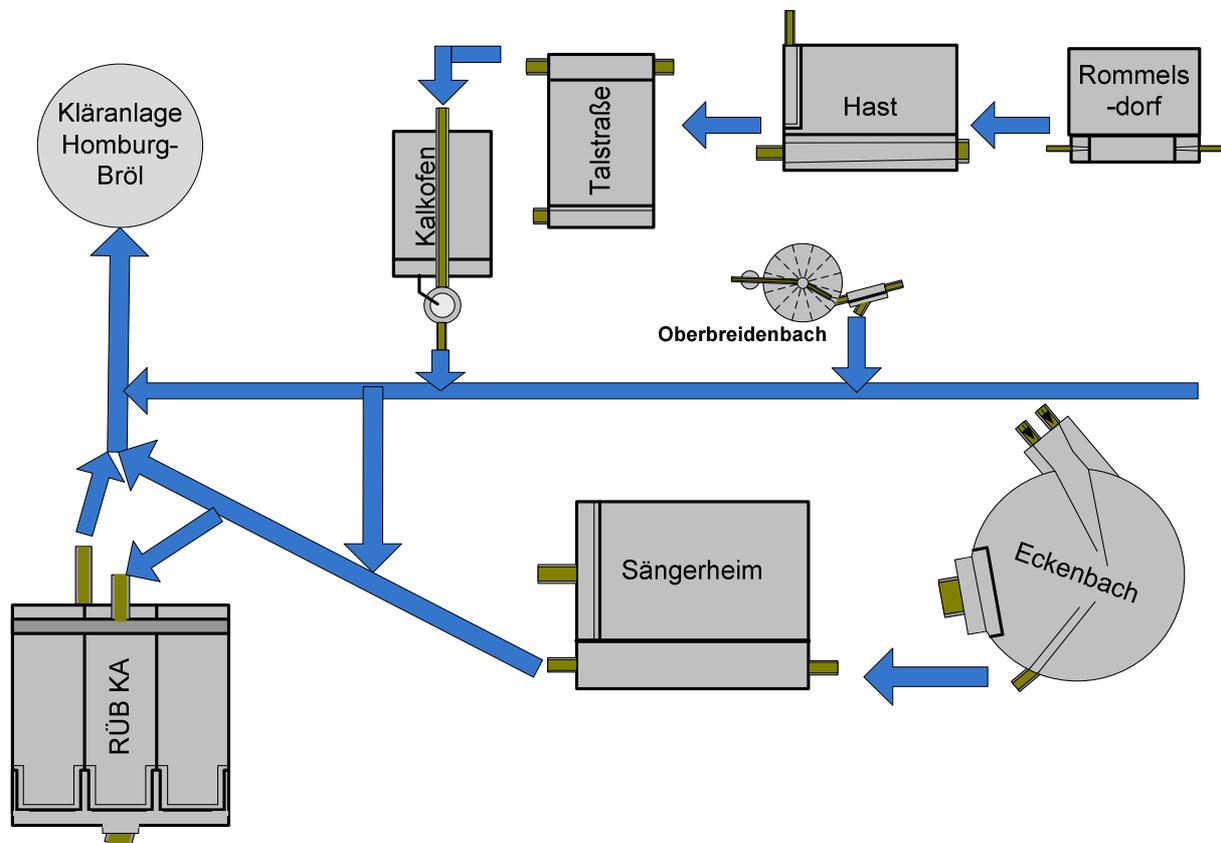


Abbildung 84: Fließschema Kanalnetz Homburg-Bröl

Das Kanalnetz im Einzugsgebiet der KA Homburg-Bröl teilt sich in zwei Hauptstränge auf, den Strang Nümbrecht und den Strang Waldbröl.

Das Einzugsgebiet Nümbrecht weist die folgenden Eckdaten auf:

- Länge : 39.000 m
- Durchmesser : von 0,1 m bis 2 m; im Durchschnitt 0,34 m
- Rohrvolumen : 5.430 m<sup>3</sup>
- RÜB Volumen : 3.290 m<sup>3</sup>

Das Einzugsgebiet Waldbröl wird durch folgende Eckdaten beschrieben:

- Länge : 115.190 m
- Durchmesser : von 0,2 m bis 1,4 m; im Durchschnitt 0,21 m
- Rohrvolumen : 10.077 m<sup>3</sup>
- RÜB Volumen : 2.387 m<sup>3</sup>

Hinweis: Das Rohrvolumen wurde nicht auf Grundlage des durchschnittlichen, sondern des exakten Durchmessers der einzelnen Rohrabschnitte errechnet.

An jedem RÜB gibt es bereits eine lokale Steuerung zur Regelung der Abflussmenge  $Q_d$ . Das Regelungskonzept wird der lokalen Steuerung übergeordnet und dem jeweiligen lokalen Stellglied einen Sollwert für den Abfluss  $Q_d$  vorgeben.

Es ist weiter zu berücksichtigen, dass es im Kanalnetz Kapazitäten (RÜB, Stauraumkanal, Regenüberlauf (RÜ)) gibt, die mit einer Regelung nicht beeinflusst werden können. Daher müssen diese bei der Optimierung und Umsetzung der Simulation bedacht werden, weil sie das Verhalten des Kanalnetzes beeinflussen und teilweise eigene autarke Steuerungen besitzen.

Die in der Simulation umgesetzten, jedoch für die Regelung zurzeit nicht betrachteten, Volumen sind:

- RÜB Marienbergshausen  
V = 300 m<sup>3</sup>  
Q<sub>d</sub> = 10 l/s
- RÜB Oberbreidenbach  
V = 219 m<sup>3</sup>  
Q<sub>d</sub> = 15 l/s
- RÜB Huppichteroth  
V = 90 m<sup>3</sup>  
Q<sub>d</sub> = 15 l/s

Diese RÜB scheiden aufgrund ihrer geringen Größe oder fehlender Stalleinrichtungen aus:

- RÜB Marienbergshausen  
Das RÜB leitet über ein Pumpwerk im Strang Elsenroth in die Kläranlage ein und ist damit nur sehr eingeschränkt für eine Regelung geeignet. Der Strang Elsenroth wird als ein konstanter Zulauf zur KA berücksichtigt.
- RÜB Huppichteroth  
Das Potenzial für die Regelung ist mit einem Beckenvolumen von 90 m<sup>3</sup> inkl. Kanal zu gering.

- RÜB Oberbreidenbach

Das Beckenvolumen von 219 m<sup>3</sup> ist gering und bietet somit wenig Einflussmöglichkeit auf das Gesamtnetz. Außerdem folgen nach einem relativ kleinen Mischsystem am RÜB Oberbreidenbach nur noch Trennsysteme. Damit fehlt eine geeignete Stellgröße für die Regelung des Beckens. Für eine zusätzliche Absicherung wurde die Frage des Regelungspotenzials detailliert über eine Simulationsreihe untersucht. Dabei wurde nachgewiesen, dass bei Regenereignissen mit einer Wiederkehrzeit (Jährlichkeit) kleiner als einem Jahr kein wesentliches Einsparpotenzial zu erwarten ist. Erst bei starken Regenereignissen mit einer Wiederkehrzeit größer als 5 Jahre wären nennenswerte Entlastungsmengen durch eine Erhöhung der Drosselwassermenge zu vermeiden. Die höhere Drosselwassermenge würde jedoch das nachgeschaltete Kanalnetz sehr belasten.

Die Zusammenführung der beiden Stränge Waldbröl und Nümbrecht direkt vor der Kläranlage ist hydraulisch komplex aufgebaut und stellt für die Simulation eine Herausforderung dar. Es existiert im Kanalnetz eine Zusammenführung der Stränge am Trennbauwerk „Museum“. Die Modellierung in der Simulation hat gezeigt, dass ohne eine genaue Überwachung des Trennbauwerks (Abbildung 85) eine optimale Zusammenführung der Teilnetze in der Simulation nicht möglich ist, da die Teilströme nicht klar definiert werden können. Dies war ein Grund für die Installation einer Durchflussmessung am Trennbauwerk Museum. Diese Durchflussmessung erfasst nun die Wassermenge, die vom Waldbröler Strang über das dort installierte Wehr in den Nümbrechter Strang übergeleitet wird.

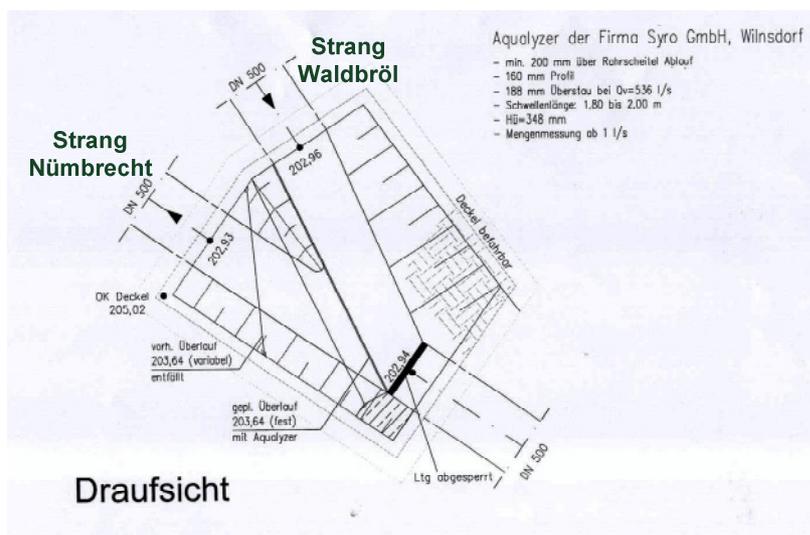


Abbildung 85: Trennbauwerk Museum [Quelle: Aggerverband]

Abbildung 86 zeigt die Zusammenführung der beiden Stränge. Für den Strang Nümbrecht (Eckenbach, Sängenheim) ist das RÜB Kläranlage auf direktem Weg angeschlossen. Bei der Überschreitung der Durchflussmenge von 85 l/s wird das Mischwasser in das Regenüberlaufbecken an der KA entlastet.

Abbildung 86 zeigt die Zusammenführung der beiden Stränge. Für den Strang Nümbrecht (Eckenbach, Sängenheim) ist das RÜB Kläranlage auf direktem Weg angeschlossen. Bei der Überschreitung der Durchflussmenge von 85 l/s wird das Mischwasser in das Regenüberlaufbecken an der KA entlastet.

Für den Strang Waldbröl (Rommelsdorf, Hast, Talstraße, Kalkofen, Oberbreidenbach) ist das anders. Wenn die Drosselwassermenge im Strang Waldbröl überschritten wird, staut sich das Wasser im Kanal bis zum Trennbauwerk Museum an und läuft durch eine Verzweigung in den Strang Nümbrecht. Diese zusätzliche Wassermenge addiert sich daher auf die Wassermenge im Strang Nümbrecht.

Für die Reglerentwicklung ist dies von elementarer Bedeutung, da durch diese Verbindung, die Stränge nicht einzeln geregelt werden können.

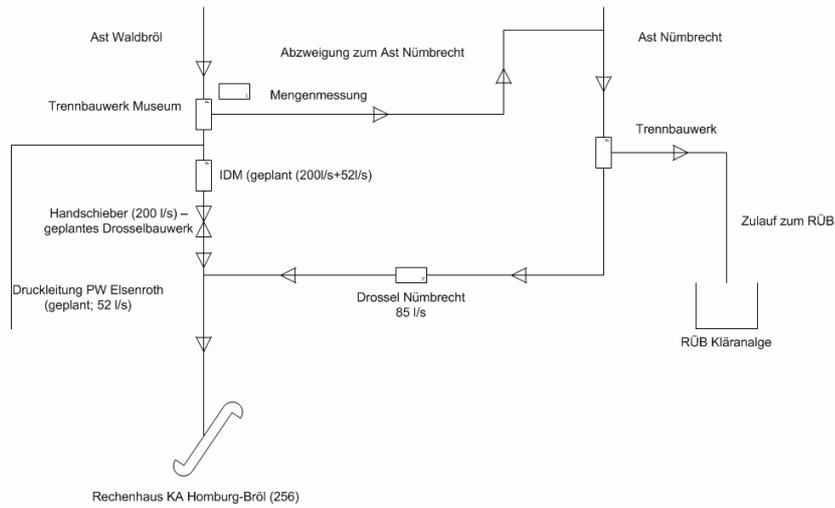


Abbildung 86: Zusammenführung der Kanalnetzstränge [QUELLE: AGGERVERBAND]

## 8.2 Belastung und Potenzial der Becken

Die Regenüberlaufbecken stellen das große Potenzial für die Regelung dar, denn an dieser Stelle können die ungenutzten Ressourcen ausgeschöpft werden.

Die folgenden Grafiken stellen eine Übersicht dar bezüglich Entlastungswassermengen und Entlastungsdauer. Sie zeigen Abwassermengen, die jährlich an den einzelnen RÜB ins Gewässer entlastet werden und die Jahresentlastungsdauer für die Jahre 2005, 2006 und 2007. Die Entlastungsmenge zeigt die allgemein hohe Belastung der RÜB Hast, Talstraße und 2007 auch des RÜB Kläranlage.

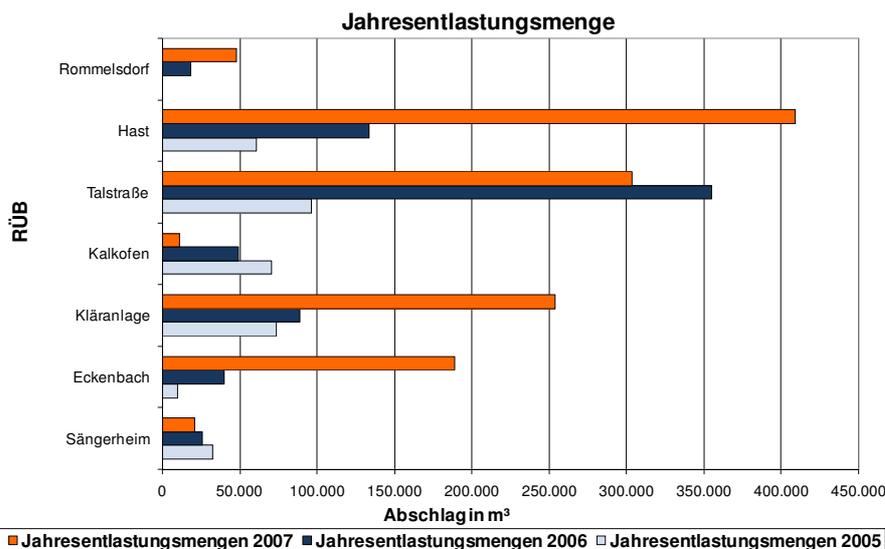


Abbildung 87: Jährliche Entlastungsmengen an den einzelnen RÜB

in einer gemeinsamen Regelung genutzt werden. Ein ähnliches Bild liefert die Betrachtung der Entlastungsdauer. Dabei sind ebenfalls die Becken Hast und Talstraße sowie das RÜB Kläranlage besonders auffällig. Die lange Entlastungsdauer an diesen RÜB lässt starke Fremdwassereinflüsse erkennen. Auch die Dauer dieser Entlastungen kann über eine integrierte Optimierung des Kanalnetzes reduziert werden.

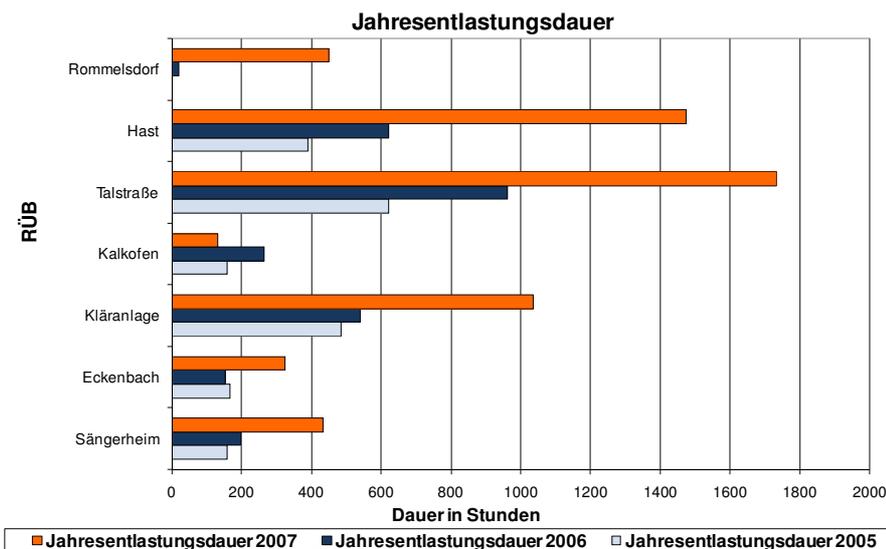


Abbildung 88: Jährliche Entlastungsdauer der einzelnen RÜB

Gleichzeitig sind die Entlastungen an den Becken Rommelsdorf, Kalkofen und Sängerheim wesentlich geringer. Daraus ist zu schließen, dass diese Becken zum Teil freie Volumina für die an den anderen Becken entlasteten Abwassermengen hätten zur Verfügung stellen können. In einer Simulation können diese Kapazitäten analysiert und

Für eine bessere Übersicht und ein tiefer gehendes Verständnis für die Simulation wird im Folgenden detailliert auf die Modellierung des Kanalnetzes mit der Simulationssoftware SIMBA® und SWMM® eingegangen.

SWMM® ist eine eigenständige Software (Toolbox), eingebunden in MATLAB.

MATLAB ist die Basis für die Simulationsberechnungen. In SWMM® werden die baulichen Gegebenheiten des Kanalnetzes umgesetzt (Haltungen, Schächte,...). SIMBA® baut ebenfalls auf die Basis von MATLAB auf und ist als Toolbox eingebunden. In SIMBA® werden die baulichen Grunddaten von SWMM® hinterlegt und mit Sonderbauwerken, wie z.B. RÜB, den Einzugsgebieten des Kanalnetzes und den Wetterzuständen zusammengeführt. Gemeinsam ergeben die Bausteine MATLAB, SWMM® und SIMBA® die Ausgangsbasis für die Simulation.

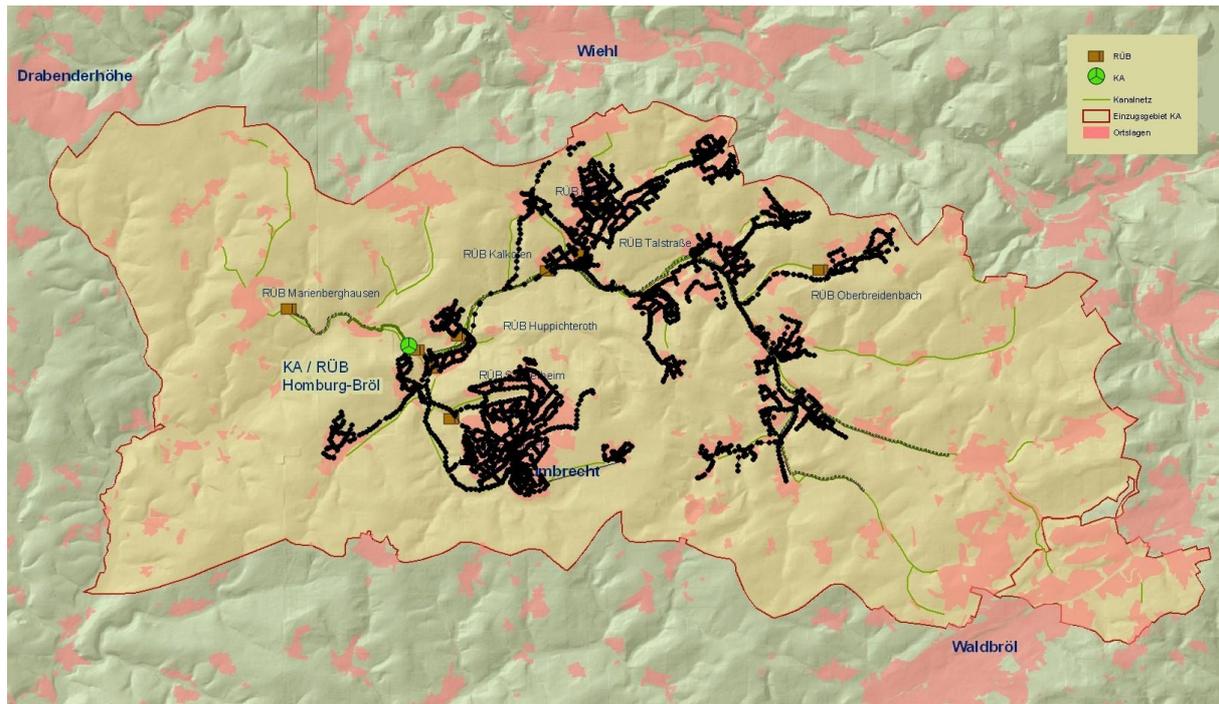
### 8.3 SWMM® Modell

Ein Abwassersystem, wie das an die Kläranlage Homburg-Bröl angeschlossene Kanalnetz, verfügt über mehrere tausend Schächte und Haltungen. Diese baulichen Gegebenheiten werden meist bereits in der Planungsphase, üblicherweise durchgeführt von einem Ingenieurbüro, in Kanalnetz-Daten (K-Daten), in einem standardisierten Format zusammengefasst und dokumentiert. In diesen K-Daten ist für jeden Schacht und für jede Haltung eine eindeutige Bezeichnung hinterlegt und die Lage im Netz auf der Basis von GPS<sup>27</sup>-Koordinaten festgehalten. Für das Modell Homburg-Bröl wurden 2.740 Haltungen und 2.767 Schächte umgesetzt.

In enger Zusammenarbeit mit der Firma Ifak GmbH (Hersteller der Software SIMBA®) ist eine Importfunktion für die K-Daten entwickelt worden. Dieses Modul dient dem automatischen Einlesen der K-Daten und beschleunigt damit die Modellierung des Kanalnetzes in der Simulation und verhindert bei den insgesamt 5.507 Datensätzen Übertragungsfehler, die bei manueller Eingabe sonst unvermeidlich wären.

Die Abbildung 89 zeigt das komplette Modell des nachgebildeten Kanalnetzes im Einzugsgebiet der Kläranlage Homburg-Bröl. Die schwarzen Punkte und Verbindungen sind die Haltungen und Schächte in SWMM®. Das Einzugsgebiet wurde als Bild hinterlegt. Es ist deutlich zu erkennen, wie gut das Modell mit der Darstellung des Einzugsgebietes auf der Karte übereinstimmt. Dies zeigt anschaulich auch die Übereinstimmung der geographischen Modellkoordinaten mit den topografischen Daten.

<sup>27</sup> Global Positioning System

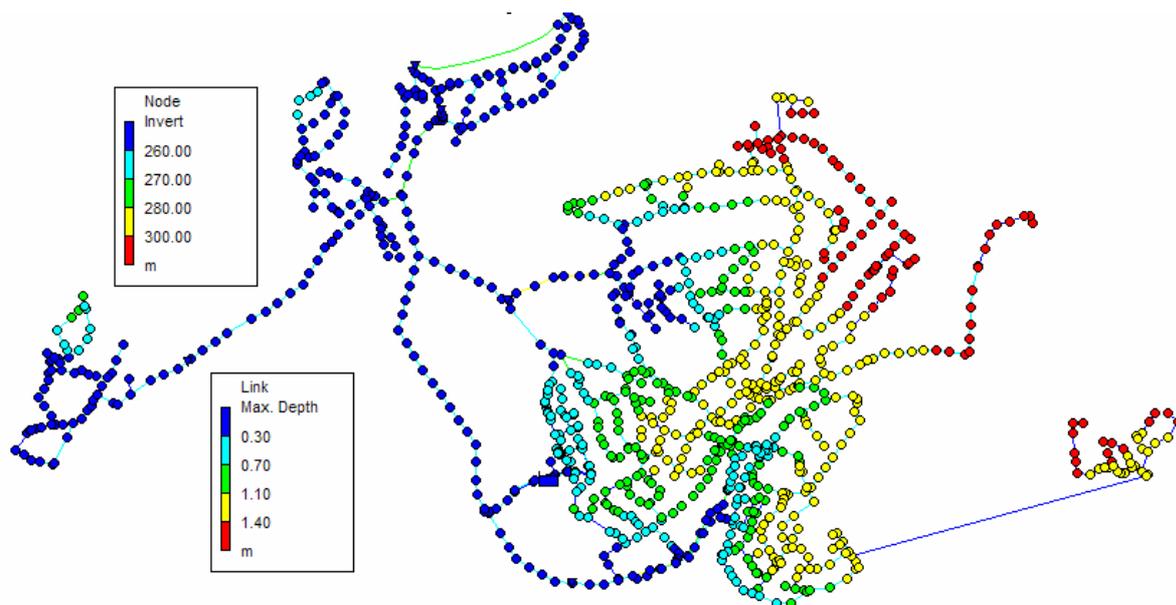


**Abbildung 89: Kanalnetzmodell aus SWMM® mit dem Einzugsgebiet der KA Homburg-Bröl im Hintergrund**

SWMM® ermöglicht eine detaillierte hydrodynamische Simulation von Kanalnetzen durch vollständige Lösung der Saint-Venant Gleichungen (Differentialgleichungen)<sup>28</sup>. Mit Hilfe von SWMM® sind die Simulation des Abwasserabflussverhaltens und des Schmutzfrachttransports möglich.

Zusätzlich besteht die Möglichkeit für Teilsysteme, Einzugsgebiete, Schächte und Haltungen zusätzliche Informationen grafisch in der Übersichtskarte des Kanalnetzmodells anzeigen zu lassen. Als Beispiel für eine detaillierte Darstellung sind in Abbildung 90 die Durchmesser der Haltungen (Max. Depth) als Farben der Verbindungslinien und die Höhen der Schächte (Node invert) als Farbe der Punkte abgebildet.

<sup>28</sup> Zur mathematischen Beschreibung von instationären Transportvorgängen stehen mit Saint-Venant partielle, nichtlineare Differentialgleichungen zur Verfügung, die für eine eindimensionale Strömung abgeleitet sind [ATV-A 110 (1988). Richtlinien für die hydraulische Dimensionierung und den Leistungsnachweis von Abwasser-Kanälen und -Leitungen, Hennef].



**Abbildung 90:** Darstellung der unterschiedlichen Durchmesser der Haltungen (Max. Depth) und Höhenlage der Schächte (Node Invert)

Anhand der frei skalierbaren Legenden können die Rohrdurchmesser und die Schachthöhen eindeutig über Farben zugeordnet werden.

Grundsätzlich besteht die Möglichkeit, auch die Einzugsgebiete, Niederschläge und Sonderbauwerke im SWMM® Modell nachzubilden. Da diese Informationen in den Kanalnetzdaten von Homburg-Bröl nicht enthalten waren, wäre eine Definition dieser Daten im SWMM® Modell sehr aufwändig gewesen. In SIMBA® ist die Einbindung der Einzugsgebiete, Niederschläge und Sonderbauwerke benutzerfreundlicher, daher wurden diese Arbeiten im SIMBA® Modell durchgeführt.

## 8.4 SIMBA® Modell

In den folgenden Abschnitten wird kurz auf die grundlegenden Funktionen der Kanalnetzmodellierung in SIMBA® eingegangen.

Abbildung 91 vermittelt einen ersten Eindruck über die Komplexität des Kanalnetzes in der Simulation. Diese Darstellung zeigt einen Blick auf das Hauptmodell in SIMBA®. In dieser Übersicht sind verschiedene Untersysteme der Simulation miteinander verbunden.

Das im vorherigen Abschnitt beschriebene SWMM® Modell (bauliche Grundstruktur des Kanalnetzes) ist als ein Untersystem in der kompletten Darstellung des Kanalnetzes als SWMM® Block im SIMBA® Modell integriert.

In SIMBA® werden zusätzlich die Niederschläge, die Einzugsgebiete und die Sonderbauwerke (z.B. RÜB) modelliert und eingebunden.

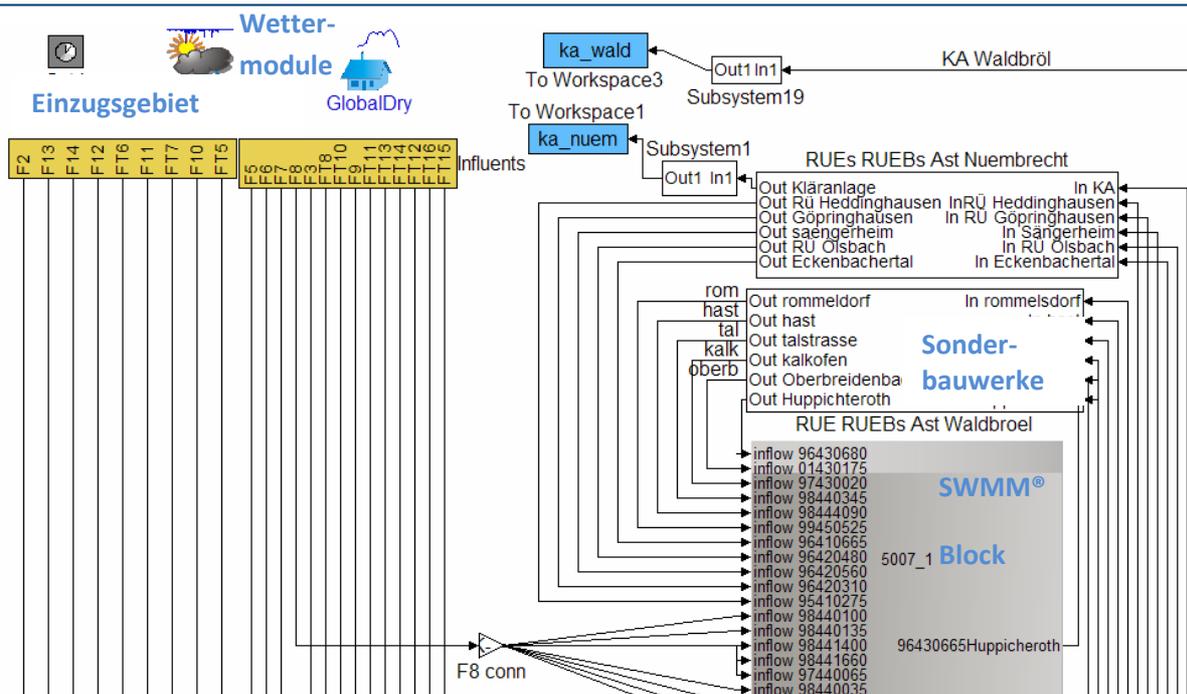


Abbildung 91: Überblick SIMBA® Modell

Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird nur der obere Teil der Grafik als Auszug des Gesamtmodells gezeigt. Für einen besseren Einblick in das Modell werden im kommenden Abschnitt die Stationen, die für eine Simulation des Netzes wichtig sind, näher erläutert (siehe Abbildung 91).

### SWMM® Block

Bei dem in der Abbildung 91 grau dargestellten SWMM® Block handelt es sich um das Grundgerüst des Kanalnetzes mit allen Haltungen und Schächten. Dieser Block dient dazu, das SWMM® Modell zu laden und in das Gesamtmodell in SIMBA® einzubinden. Es ist somit die Verknüpfung zwischen den beiden Modellen SIMBA® und SWMM®.

Auf der linken Seite des SWMM® Blocks sind die Eingänge in das SWMM® Modell zu erkennen. Jeder dieser Eingänge, z.B. „inflow 96430680“, symbolisiert einen Startschacht. Startschächte sind die Schächte, an denen ein Kanalabschnitt beginnt. Diese werden manuell anhand von Kanalnetzplänen definiert.

### Einzugsgebiete

Da in den Kanalnetz-Daten keine Informationen zu den Einzugsgebieten enthalten sind, müssen diese separat in SIMBA® definiert werden. Dies erfolgt im Untersystem (Subsystem) „Influents“. Der Eingangsblock „Einzugsgebiet“, wie in Abbildung 92 gezeigt, steht für das Untersystem mit Simulation der Einzugsgebiete.

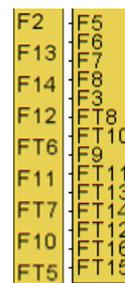


Abbildung 92: Block Einzugsgebiete, rechts Nümbrechter Kanal und links Waldbröler Kanal

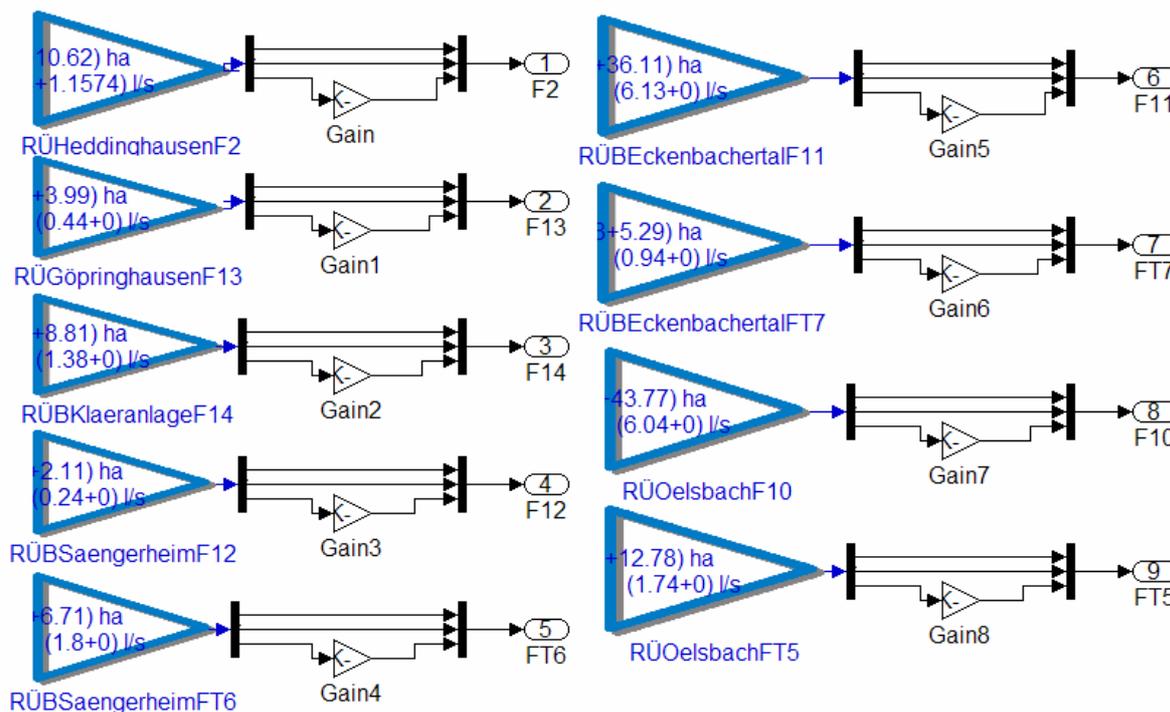


Abbildung 93: Untersystem „Einzugsgebiet“ für den Nümbrecht Strang des Kanalsystems

Für die vorher bestimmten Startschächte der einzelnen Einzugsgebiete werden durch Verstärker (Gain) die zugehörigen hydraulischen Zuflüsse in der Simulation festgelegt. Im Modell wird der Abfluss aus einem Einzugsgebiet zu gleichen Teilen auf die einzelnen Startschächte im Gebiet aufgeteilt. Jedes der blauen Dreiecke in Abbildung 93 stellt dabei das Modell eines Einzugsgebietes dar und kann individuell konfiguriert und über Einstell-Parameter an das Verhalten des Einzugsgebietes angepasst werden. An dieser Stelle erfolgt die eigentliche Parametrierung des Modells.

### Sonderbauwerke

Ebenso wie die Einzugsgebiete werden auch die Sonderbauwerke im SIMBA® Modell definiert. Dies erfolgt ebenfalls in einem eigenen Untersystem und ist über einen separaten Block eingebunden (Abbildung 94). Hinter diesem Block verbirgt sich die Konfiguration und Modellierung der Bauwerke (Abbildung 95).

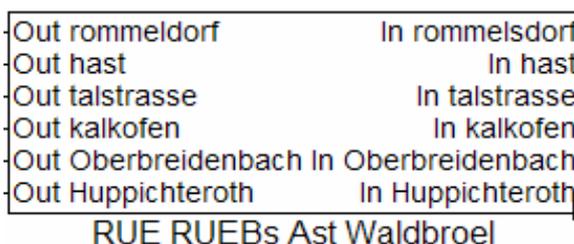


Abbildung 94: Block Sonderbauwerke für Strang Waldbröl

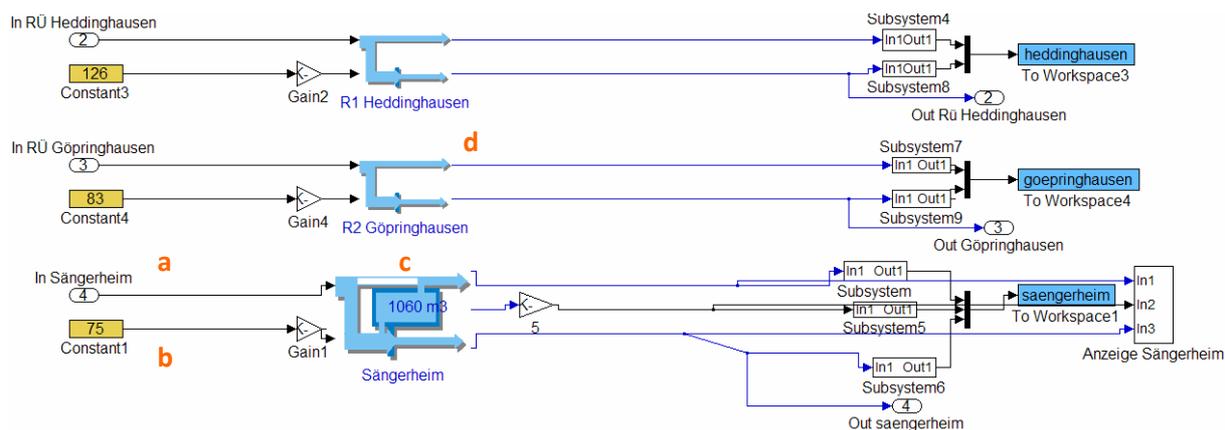


Abbildung 95: Auszug aus den Sonderbauwerken im Strang Nümbrecht

Die Eingänge (a) des Untersystems, also die Zuläufe eines jeden Sonderbauwerkes (RÜ oder RÜB), werden im SWMM® Modell als so genannte Outfalls definiert.

Für jedes der hier betrachteten Sonderbauwerke wird der Abfluss aus dem Bauwerk heraus durch einen Drosselschieber begrenzt. Diese Limitierung ist im ersten Schritt der Simulation die genehmigte Drosselwassermenge für das Homburg-Bröl Kanalsystem, basierend auf dem Stand des Netzplans Stand 2005. Die Drosselung erfolgt in der Simulation durch die Definition einer Konstanten im Zulauf des Sonderbauwerkes (b). Über den nachgeschalteten Verstärker wird die vorgegebene Drosselmengen von l/s in das von SIMBA® benötigte Format m<sup>3</sup>/d umgerechnet.

Generell sind im Einzugsgebiet zwei grundlegende Typen von Sonderbauwerken vorhanden:

- Regenüberlaufbecken (RÜB)
- Regenüberläufe (RÜ) (d)

Für die Regenüberlaufbecken, hier das RÜB Sangerheim, werden zwei wichtige Einstellungen vorgenommen:

- Der Beckentyp
- Die Beckengröße

Jeder Bauwerkstyp RÜ und RÜB hat einen Ausgang für den Ablauf (unterer Ausgang c) sowie für die Entlastung (oberer Ausgang c). Die RÜB haben zusätzlich einen mittleren Ausgang für den Füllstand im Becken.

Die Entlastungen werden dokumentiert und aus dem Massenstrom des Systems entnommen, die Abläufe hingegen werden an vordefinierten Punkten wieder im Hauptmodell in SIMBA®, in den SWMM® Block zurück geführt und gehen somit in die weiteren hydrodynamischen Berechnungen ein.

### Wettermodule

Über die beiden Module „Niederschlag“ und „Trockenwetter“ werden die hydraulischen Eingangsdaten – der Zufluss – für das Modell definiert.

Das Modul Niederschlag definiert den Regen im Einzugsgebiet,

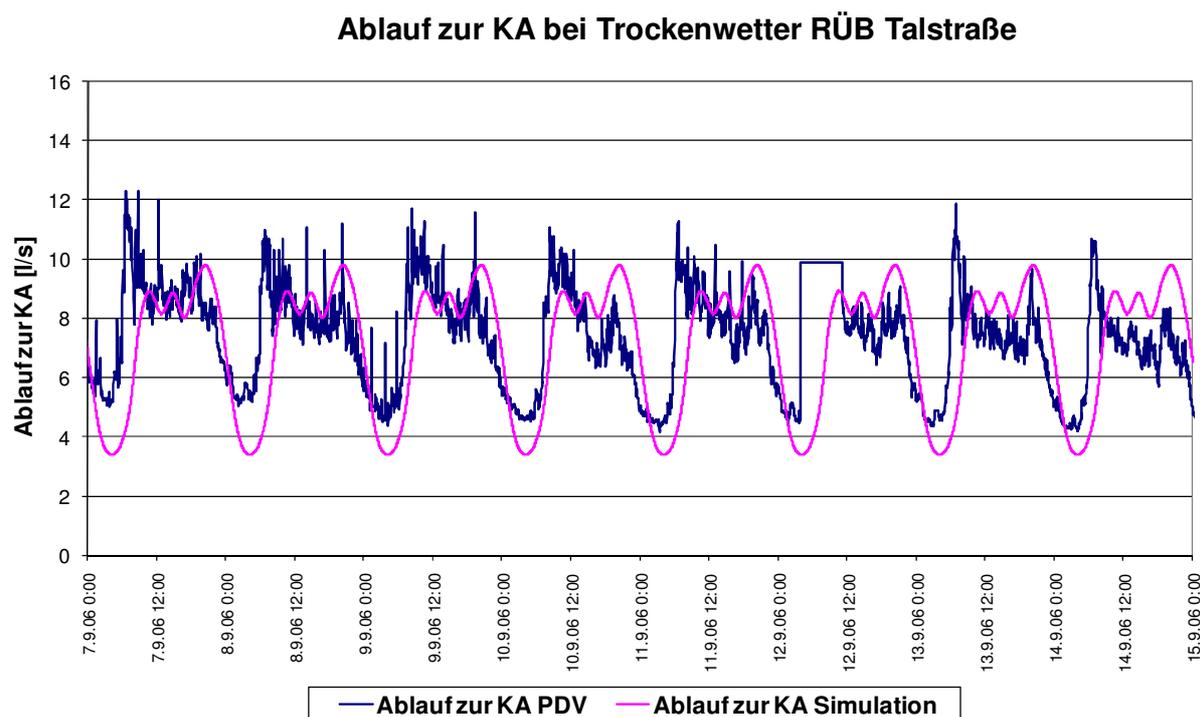


Abbildung 96: Wettermodule

gibt also die Niederschlagsdaten vor.

Im Modul Trockenwetter ist für den Trockenwetterzulauf jedem einzelnen Einzugsgebiet die entsprechende tägliche Trockenwetter-Zuflussmenge zuzuweisen. Daraus erzeugt das Modul an dieser Stelle automatisch einen Tagesverlauf.

Die folgende Grafik zeigt einen typischen Trockenwettergang am Beispiel des RÜB Talstraße am Ablauf Richtung Kläranlage. Der Trockenwetter-Tagesgang stellt die Belastung der Kanalisation mit Schmutzwasser dar.



**Abbildung 97: Simulation Trockenwetter**

Nachdem alle nötigen Einstellungen vorgenommen wurden und alle für das Kanalnetz relevanten Teilsysteme abgebildet sind, folgt die Validierung und die Kalibrierung des Modells in der Simulation mit Messdaten aus dem kommunalen Homburg-Bröl Netz. Diese Referenzdaten stammen aus den Messcontainern bzw. Messhäusern an den RÜB.

#### 8.4.1 Kalibrierung im SIMBA® Modell

Ein Hauptproblem der Kalibrierung abwassertechnischer Kanalnetze ist die Nachbildung und Bestimmung der Randparameter des Modells, um das reale Niederschlags-Abfluss-Verhalten (N-A-V) möglichst detailgetreu nachzubilden.

Die Darstellung des eigentlichen Kanalnetzes – Koordinaten, Länge von Haltungen, Gefälle und Durchmesser – ist durch Baupläne und Vermessungsdaten in den Kanalnetz-Daten vorgegeben.

Problematisch bleibt jedoch die Definition des Einzugsgebietes. Neben den angeschlossenen Einwohnerwerten und dem Standardtagesgang bei Trockenwetter sowie den geografischen Daten (Lage und Größe), müssen weitere den Abfluss bestimmende Eigenschaften festgelegt werden.

Im Folgenden wird dargestellt, welche einzelnen Randbedingungen Einfluss nehmen und das Niederschlag-Abfluss-Verhalten im Einzugsgebiet bestimmen. Dem Kanalnetz fließt zu einem Zeitpunkt eine bestimmte Wassermenge zu. Mit welcher Geschwindigkeit und mit welcher Menge dieses Wasser zufließt, hängt von den gezeigten Einflussparametern in Abbildung 98 ab. Die spezielle Wetterlage, der Niederschlag, das Kanalnetz, die Boden- und Oberflächen-Beschaffenheit sowie das Grundwasser wirken sich auf das Gesamtverhalten des Niederschlag-Abflusses aus.

Die einzelnen Faktoren werden ebenfalls durch verschiedene Kriterien charakterisiert. Im Folgenden sind diese aufgeführt [IFAK 2001<sup>29</sup>]:

- Wetter:
  - Temperatur
  - Sonnenscheindauer
  - Jahreszeit
  - Windrichtung
- Niederschlag:
  - Intensität
  - Niederschlagsart (Regen, Schnee...)
  - Niederschlagsdauer
  - Trockenheit bzw. Zeit ohne Niederschlag
  - Niederschlagsmenge

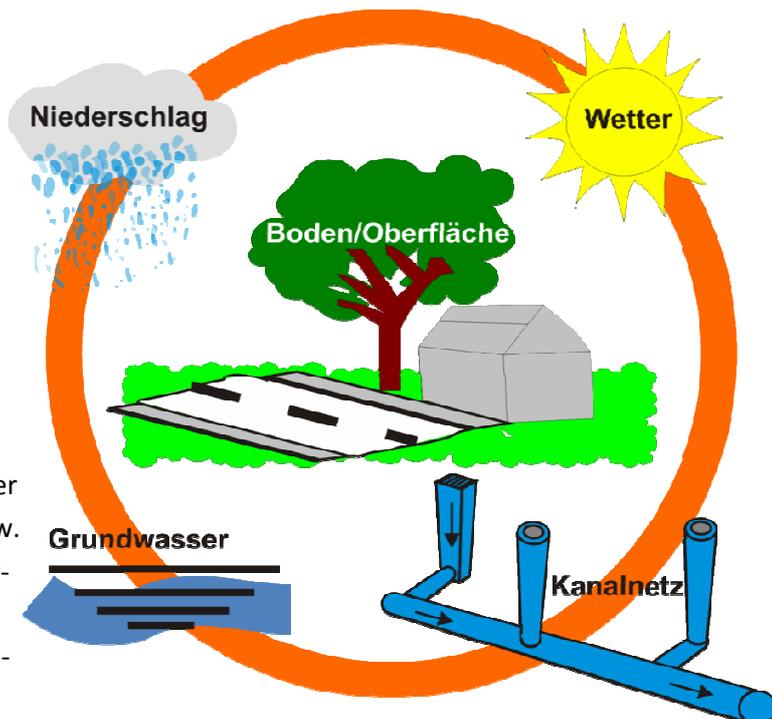


Abbildung 98: Beeinflussung des Niederschlag-Abfluss-Verhaltens durch Einzelsysteme

- Boden/Oberfläche:
  - Verdunstung
  - Art der Bebauung/Landnutzung (Wald, Wiese, häusliche Bebauung...)
  - Dachflächen
  - Retention
  - Bodenart
  - Wassersättigung des Bodens
  - Muldenverluste
  - Versiegelungsgrad
  - Neigungsklasse
- Grundwasser dringt in Form von Fremdwasser in das Kanalnetz ein:
  - Grundwasserspiegelhöhe
  - Fließgeschwindigkeit
  - Art des Grundwasserleiters
- Kanalnetz:
  - Zustand (Dichtigkeit, Verlegung...)

<sup>29</sup> SIMBA® 4.0 – Simulation der biologischen Abwasserreinigung. Benutzerhandbuch. Institut für Automation und Kommunikation e.V. Magdeburg

- Fließzeiten
- Wassermengen/Kapazität
- Fremdwasseranteil

Das Abflussverhalten der Teilsysteme wird stark durch die jeweils aufgeführten Kriterien beeinflusst. Es gibt auch Co-Abhängigkeiten der unterschiedlichen Faktoren, dies bedeutet, dass einzelne Kriterien teilweise auch von anderen Systemparametern beeinflusst werden.

Die genannten Zusammenhänge zeigen die Notwendigkeit, dass diese Einflüsse für die Einzugsgebiete zu definieren sind. Es müssen Möglichkeiten gefunden werden, diese für verschiedene Zustände in die Simulation zu integrieren.

Ein Teil dieser Systeme und deren beschriebene Kriterien können mit den Parametern für befestigte und unbefestigte Flächen [IFAK 200730] direkt im Simulations-Modell angepasst werden.

Parameter befestigte Fläche:

- A0: Anteil der befestigten Fläche, der zu Beginn eines Regenereignisses abflusswirksam wird (Startwert: 25%)
- A: Anteil der befestigten Fläche, der gegen Ende eines Regenereignisses abflusswirksam wird (Startwert: 85%)
- VBen: Benetzungsverluste (Startwert: 0,7mm)
- VMuld: Muldenverluste (Startwert: 1,8mm)

Parameter unbefestigte Fläche:

- VBen: Benetzungsverluste (Startwert: 2mm)
- WS: Wassersättigung des Bodens (Startwert: 12mm)
- Tb: Zeitkonstante für Wirksamkeit der Infiltration (Startwerte: 12min)
- Tc: Zeitkonstante für Rückgang der Infiltration (Startwerte: 25min)

Eine manuelle Parametrierung dieser Werte für alle Einzugsgebiete ist sehr aufwändig. Daher wird ein Computational Intelligence Tool, das Simplex-Verfahren<sup>31</sup>, für eine automatische Parameter Anpassung in MATLAB herangezogen.

Dabei werden alle Parameter durch wiederholte Simulationsdurchläufe angepasst, bis der Modellfehler im Vergleich zu den Messdaten aus den Messcontainern minimal geworden ist. Je nach Art der Simulationsergebnisse und der Parameter Anzahl werden dazu mehrere tausend Simulationschritte benötigt. Untersuchungen in der Simulation haben ergeben, dass es sinnvoll ist, für jedes Mischwasser-Aufkommen bei einem Regenereignis eine separate Parameteranpassung vorzunehmen. Die Parameter für unbefestigte Flächen sind besonders zu berücksichtigen. Bei jedem Niederschlagsereignis wirken die einflussnehmenden Faktoren mit unterschiedlicher Intensität auf das Gesamtsystem ein.

In der folgenden Tabelle sind die eingestellten Parameter für die Einzugsgebiete der einzelnen RÜB in der Simulation für ein Regenszenario angegeben. Werte, die gegenüber den Standardparametern abweichen, sind farblich hervorgehoben.

<sup>30</sup> SIMBA® 5.2 – Simulation of sewer systems integrated in SIMBA. Benutzerhand-buch. Institut für Automation und Kommunikation e.V. Magdeburg

<sup>31</sup> Das **Simplex-Verfahren** ist ein Verfahren der Numerik zur Lösung linearer Optimierungsprobleme. Dabei untersucht das Verfahren, ausgehend vom Ursprung, die Eckpunkte des zulässigen Lösungsraums, um das Maximum der Zielfunktion zu bestimmen bis keine Verbesserung mehr möglich ist.

**Tabelle 10: Eingestellte Parameter der Einzugsgebiete der Regenüberlaufbecken in der Simulation für Szenario 4**

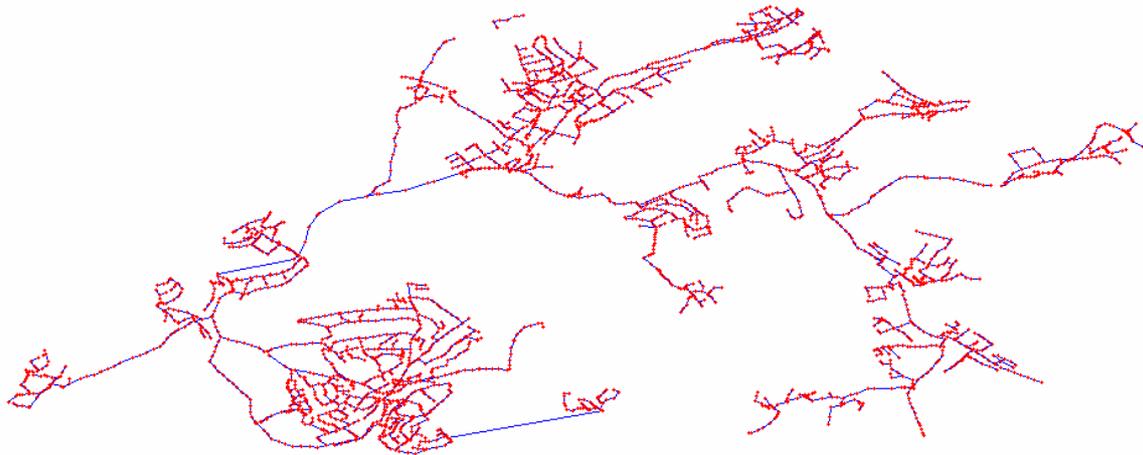
Becken	Parameter befestigte Fläche				Parameter unbefestigte Fläche			
	$A_0$	A	$V_{Ben}$	$V_{Muld}$	$V_{Ben}$	$W_s$	$T_b$	$T_c$
Eckenbach	40%	85%	0,5mm	1,5mm	2mm	12mm	12min	75min
Sängerheim	35%	85%	0,7mm	1,8mm	2mm	12mm	12min	75min
Kläranlage	40%	85%	0,7mm	1,8mm	2mm	12mm	12min	75min
Oberbreidenbach	25%	85%	0,7mm	1,8mm	2mm	12mm	12min	75min
Rommelsdorf	25%	85%	0,7mm	1,8mm	2mm	12mm	12min	75min
Hast	25%	75%	0,7mm	1,8mm	2mm	12mm	12min	75min
Talstraße	25%	85%	0,7mm	0,0mm	2mm	12mm	12min	75min
Kalkofen	15%	65%	1,0mm	2,0mm	2mm	12mm	12min	75min

Anzustreben sind feste Parametersätze für annähernd gleiche Niederschlagsbedingungen im Einzugsgebiet der Kläranlage Homburg-Bröl, da sich die Parameter-Optimierung trotz weitestgehender Automatisierung als sehr zeitintensiv herausstellt. So benötigt die Optimierung eines Regenszenarios ca. drei Tage Rechenzeit an Mehrprozessor-Hochleistungs-PCs.

#### 8.4.2 Visuelle Auswertung des Kanalnetzes mit dem SWMM® Monitor

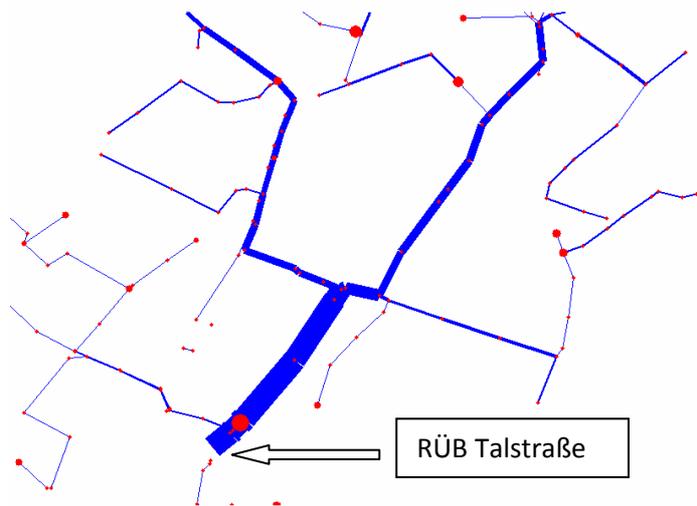
Bezogen auf die Validierung und Kalibrierung des Modells ist eine visuelle Auswertung der Ergebnisse ein erster Ansatz für die Prüfung der Qualität der Simulation. Gut ausgearbeitete, grafische Darstellungen über die Güte der Simulation, im Vergleich mit den gemessenen Referenzdaten aus dem kommunalen Kanalnetz, sind weiterhin für die Beweisführung und Protokollierung der Ergebnisse ein geeignetes Werkzeug. Diese Bilder sind in der Lage, auch einem Laien den Zustand des Systems zu erläutern, ohne dass dieser direkt die Simulationssoftware oder das Modell verstehen muss.

Im Anschluss an einen Simulationslauf in SIMBA® kann die hydraulische Belastung des Kanalnetzes über den Zeitraum der Simulation mit dem SWMM® Monitor komplett abgebildet werden (Abbildung 99).



**Abbildung 99: Belastung des Kanalnetzes im Einzugsbereich der Abwasserreinigungsanlage Homburg-Bröl**

Die roten Punkte stellen Schächte, die blauen Linien Haltungen (Kanalabschnitte) dar. Auf die Darstellung der Schacht- und Haltungsnummern wurde hier zum Erhalt der Übersicht verzichtet, aber im Netz ist jeder Kanalabschnitt durch eine eindeutige Ziffer gekennzeichnet.



**Abbildung 100: Ausschnittvergrößerung bei einem Starkregenereignis. Hier ist der Bereich um das RÜB Talstraße vergrößert.**

Die visuelle Überprüfung hat bei der Modellentwicklung maßgeblich geholfen, Fehlerquellen schnell zu erkennen.

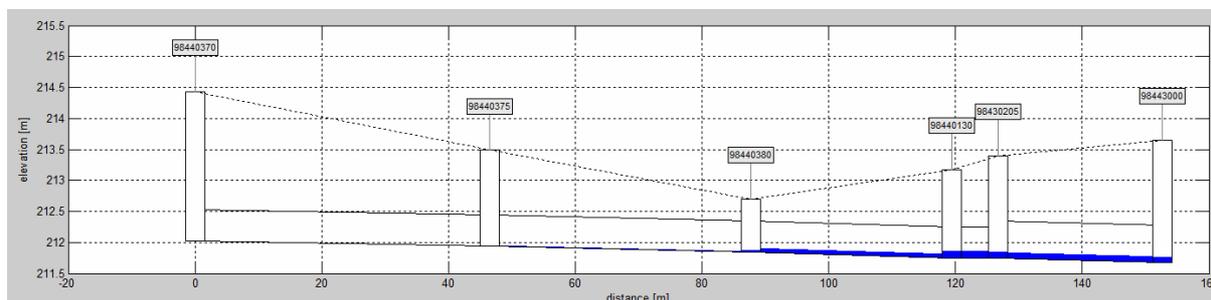
Für die bessere Lokalisierung von Mängeln im Modell kann für eine detaillierte grafische Auswertung beliebig in das System hinein gezoomt werden (Abbildung 100). Die vergrößerten roten Markierungen (Punkte) der Schächte signalisieren die Füllhöhe an diesen Stellen. Die Stärke der blauen Linien ist ein Maß für die Durchflussmenge in den betreffenden Haltungen.

Der Wasserstand von beliebigen Teilbereichen des Kanalnetzes kann über den gesamten Simulationsverlauf beobachtet werden. Hierzu werden im SWMM® Modell Längsschnitte definiert, indem der Start- und Endpunkt des zu betrachtenden Kanalabschnitts festgelegt wird. Die Auswertung dieses Abschnitts wird im SWMM® Monitor während der Simulation betrachtet. Besonders hilfreich sind Videomitschnitte dieser Sequenzen für eine spätere, nachträgliche Auswertung.

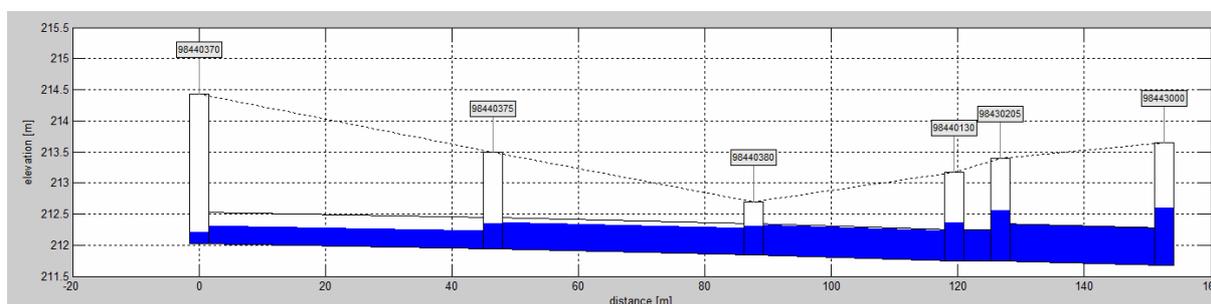
Die folgenden Abbildungen zeigen einen solchen Längsschnitt zu unterschiedlichen Zeitpunkten einer Simulation mit einem 10-jährlichen Regenereignis<sup>32</sup>. Die Zahlen an den Balken sind die Schachtnum-

<sup>32</sup> 10-jährliches Regenereignis bedeutet, dass die Regenintensität so stark ist, dass dieses Ereignis statistisch nur einmal in 10 Jahren auftritt.

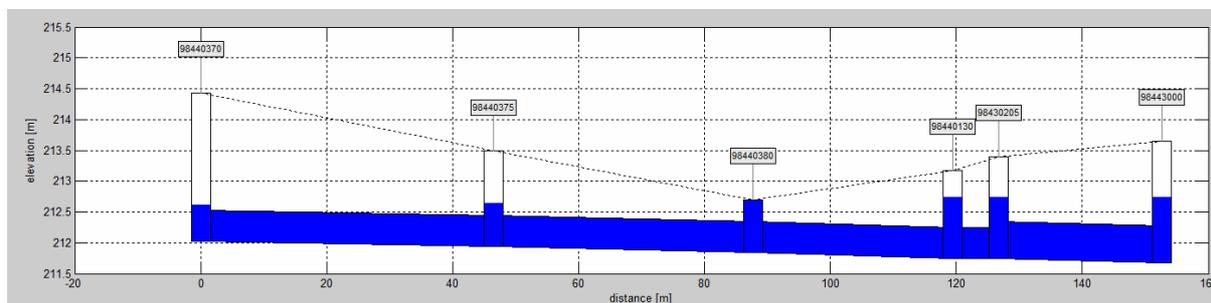
mern. Die untere Verbindung zwischen zwei Schächten definiert eine Haltung (Kanalrohr). Hierin wird im Verlauf in blauer Farbe der Wasserstand dargestellt. Die gestrichelte obere Linie bildet das Geländeprofil ab.



**Abbildung 101:** Längsschnitt unterhalb des RÜB Talstraße zu Beginn des Regenereignisses



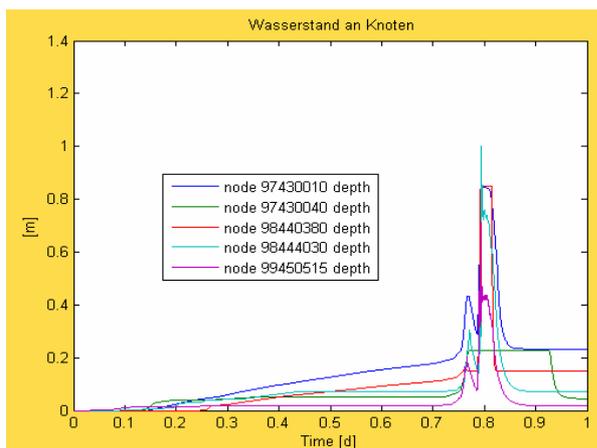
**Abbildung 102:** Längsschnitt zu einem späteren Zeitpunkt der Simulation



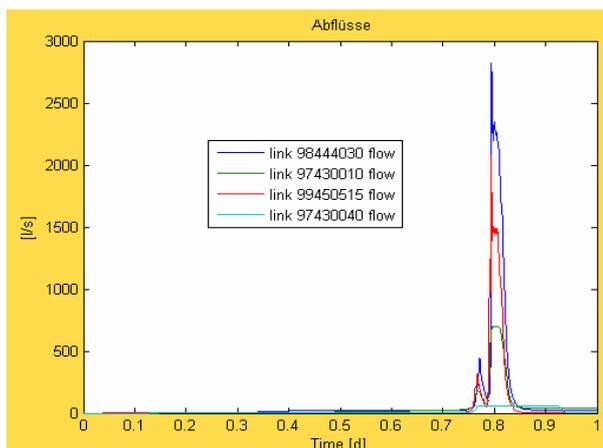
**Abbildung 103:** Längsschnitt zu einem Zeitpunkt, an dem ein Schacht (Schachtnummer 98440380) komplett angestaut ist

In den dargestellten drei Grafiken ist die Auswirkung des Regenereignisses im Kanalnetz zu erkennen. Zu Beginn des Niederschlags befindet sich wenig Wasser im Kanal (Trockenwetterabfluss). Zu einem späteren Zeitpunkt der Simulation wird die Abflusswelle wirksam und das Wasser steigt bereits in einigen Schächten an. Am Höhepunkt des Ereignisses ist der Schacht (Schachtnummer 98440380) komplett eingestaut und es an kommt an dieser Stelle zu einem Austritt des Wassers aus dem Kanalnetz.

Für weitere hydraulische Auswertungen wird von dem Institut für Automation und Kommunikation (ifak) ein Scriptblock zur Verfügung gestellt, mit dem an ausgewählten Schächten und Haltungen die Einstauhöhe (Abb. links) und die Abflussmengen (Abb. rechts) betrachtet werden können.



**Abbildung 104: Wasserstände an verschiedenen Knoten (Schächten) quantifiziert über den gesamten Simulationsverlauf**



**Abbildung 105: Abflüsse in verschiedenen Haltungen quantifiziert über den gesamten Simulationsverlauf**

Die beschriebenen hydraulischen Auswertungen bieten gute Möglichkeiten zur Prüfung des Modells auf realitätsnahe Simulationsergebnisse und darüber hinaus zur weitergehenden Überprüfung der Kanalnetzregelung in der Simulation, insbesondere bei der Überwachung der hydraulischen Belastung des Kanalnetzes.

## 8.5 Kalibrierung der Kanalnetz-Simulation

Für die optimale Validierung des Kanalnetzmodells werden aus dem Jahr 2006 und 2007 Regenszenarien im Einzugsgebiet der KA ausgewählt, um mit Hilfe dieser Daten das Modell in der Simulation zu kalibrieren.

Im Folgenden werden alle zur Kalibrierung genutzten Simulationszeiträume und die Intensität der dazugehörigen Regenereignisse aufgeführt, die im weiteren Projektverlauf auch zur Regler-Optimierung heran gezogen werden:

Szenario 1:	17.09.06 – 18.09.06	1-jährliches Ereignis
Szenario 2:	25.07.05 – 31.07.05	wurde nicht weiter ausgewertet
Szenario 3:	01.01.07 – 17.01.07	kleiner als halbjährliches Ereignis
Szenario 4:	15.01.07 – 23.01.07	2-jährliches Ereignis
Szenario 5:	25.02.07 – 11.03.07	kleiner als halbjährliches Ereignis
Szenario 6:	21.06.07 – 28.06.07	zw. 1- und 2-jährlichen Ereignis
Szenario 7:	08.08.07 – 15.08.07	zw. 0,5- und 1-jährlichen Ereignis
Szenario 8:	15.08.07 – 20.08.07	5-jährliches Ereignis
Szenario 9:	20.08.07 – 29.08.07	20-jährliches Ereignis

Bis einschließlich Szenario 9 werden die aufgelisteten Szenarien ausführlich simuliert. (Szenario 2 wird aus den weiteren Betrachtungen aufgrund unzureichender Qualität der Referenzdaten herausgenommen.)

Während der Auswertung der einzelnen Szenarien fällt auf, dass in der Simulation im Hauptsammler des Strangs Waldbröl, an dem alle Nebenstränge zusammenkommen, die Wassermenge im System zu gering ist.

Als Ursache werden zwei Übergabestellen aus dem Einzugsgebiet in „Happach“ und „Bröl“ lokalisiert. Diese beiden Punkte stellen Schnittstellen zwischen dem Kanalnetz des Aggerverbandes und der Kommunen dar. Es handelt sich bei beiden Einzugsgebieten um Trennsysteme. Daher wird an diesen Stellen bisher nur mit einem Trockenwetter-Tagesgang entsprechend der angeschlossenen Einwohnerwerte simuliert, da dort kein Regenwasser wirksam werden sollte. In Abbildung 106 sind die beiden Übergabeschächte Bröl und Happach eingezeichnet.

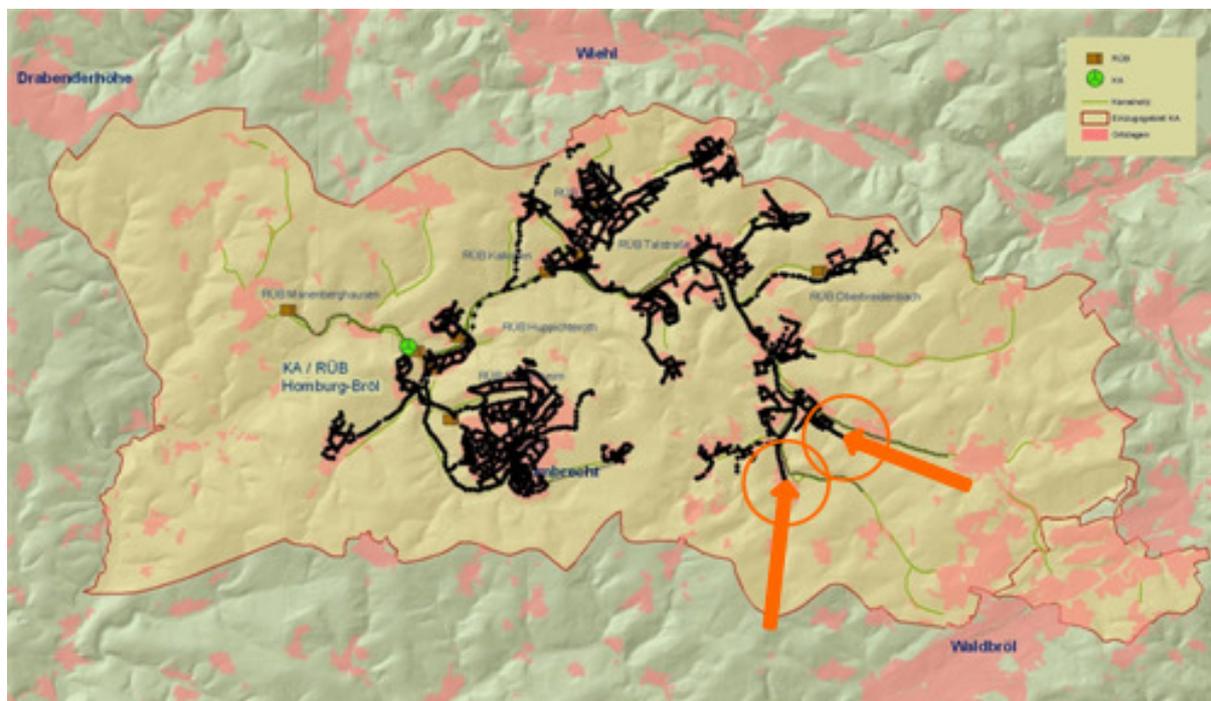


Abbildung 106: Übergabestellen Happach und Bröl

Anhand von aufgezeichneten Messdaten an den beiden Übergabestellen werden die gemessenen Werte mit den an dieser Stelle simulierten Werten verglichen.

Als Zeitraum wurde das Szenario 8, ein recht starkes Ereignis (5-jährliches Ereignis) ausgewählt. In der Abbildung 107 und Abbildung 108 sind die Ergebnisse der Validierung an den Messstellen Bröl und Happach dargestellt.

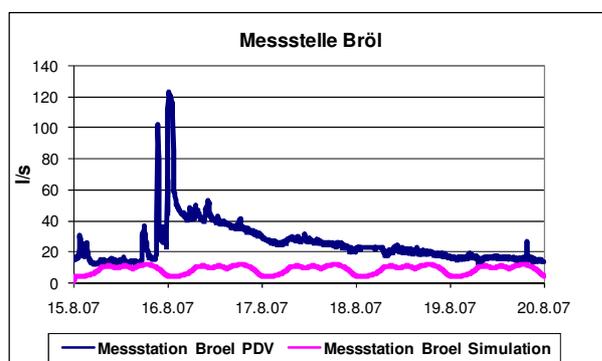


Abbildung 107: Vergleich PDV und Simulation an der Übergabestelle Bröl

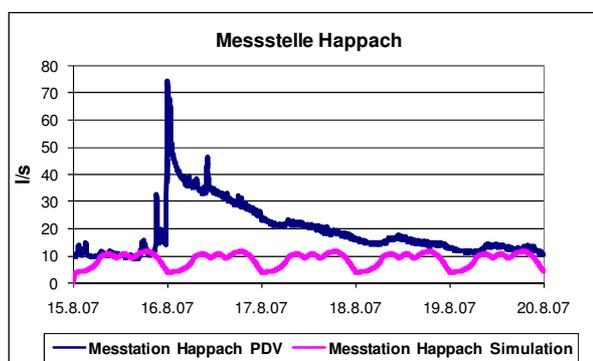


Abbildung 108: Vergleich PDV und Simulation an der Übergabestelle Happach

In den Grafiken ist deutlich zu erkennen, dass in der Simulation nur der Trockenwettertagesgang simuliert wird, wie es für ein Trennsystem zu erwarten ist. Die Messwerte zeigen allerdings bei Regen einen erheblichen Anstieg der Durchflussmenge. Dieser Anstieg der Wassermenge im Hauptsammler

fehlt somit bisher in der Simulation. Er kann auf den Einfluss von Fremdwasser im Einzugsgebiet von Happach und Bröl zurückgeführt werden.

Zur Verbesserung der Simulation werden die Messwerte der Übergabestellen in die Eingangsdatenbank als zusätzlicher Parameter aufgenommen.

## 8.6 Ergebnisse der Kanalnetzsimulation

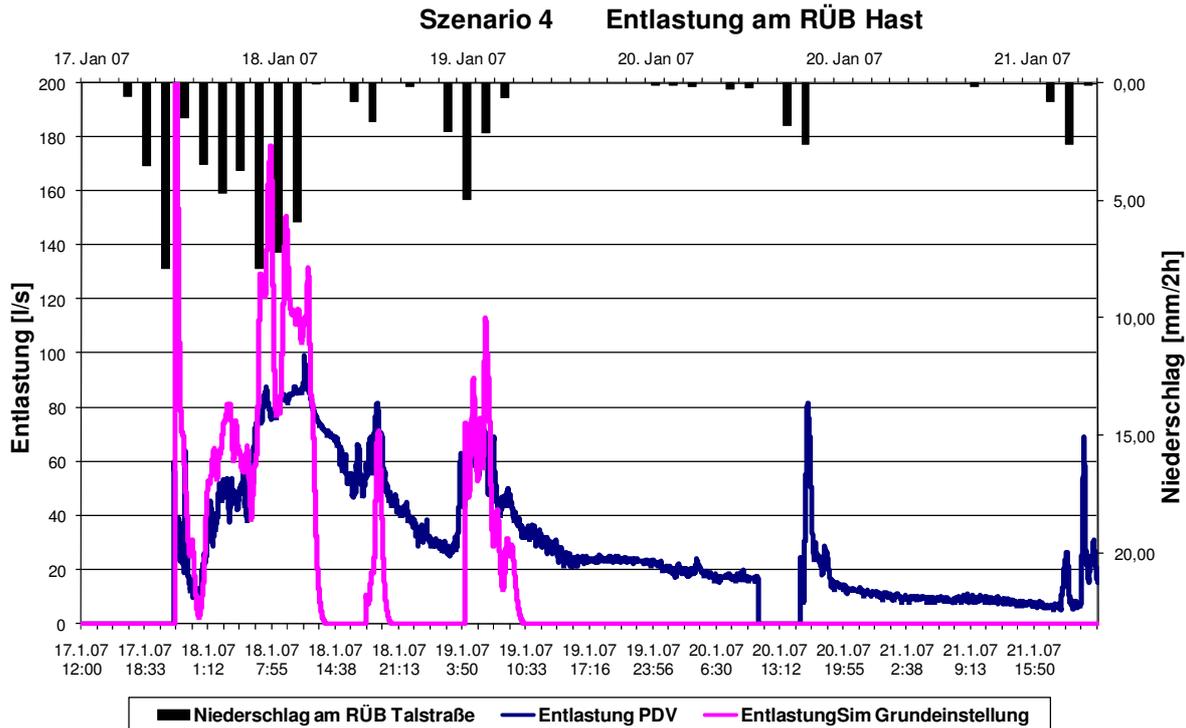
Im Folgenden werden die Ergebnisse der Simulation vorgestellt. Dabei wird Schritt für Schritt gezeigt, welche Optimierungsmaßnahmen vorgenommen werden und zu welchen Verbesserungen sie führen.

### *Schritt 1: Simulation im Grundzustand*

In der ersten Phase der Simulation werden alle baulichen Vorgaben aus den Kanalnetz-Daten sowie Sonderbauwerken umgesetzt und die entsprechenden Einzugsgebiete zugewiesen.

Eine Datenbank für die Szenarien eins bis neun, mit allen Regendaten und den Messdaten aus dem Kanalnetz an den Stellen Happach und Bröl, stellt bei den Untersuchungen den Eingangsdatensatz für das Modell. Ausgewählte Messwerte der Container an den Regenüberlaufbecken dienen als Referenz und zum Nachweis der Funktionalität und Güte der Simulation. Das Ziel ist eine realitätsnahe Abbildung der simulierten Abflussvorgänge im Kanalnetz gegenüber den Messungen im kommunalen Abwassersystem Homburg-Bröl.

Am Anfang wird die Simulation mit den Standard-Parametern, die vom Hersteller der Software vorgegeben werden, durchgeführt. Die Realitätsnähe gibt Abbildung 109 am Beispiel des Szenarios 4 mit einer Entlastung des Regenüberlaufbeckens Hast wieder. Zu sehen ist die Entlastungsmenge des RÜB in der Simulation im Vergleich zu den gemessenen Daten aus der Prozessdatenverarbeitung des Aggerverbands.



**Abbildung 109: Simulation im Grundzustand, Entlastung RÜB Hast**

Mit dieser Simulation kann die Entlastung der RÜB nicht ausreichend nachgebildet werden. Es kann zwar der Beginn des Abschlags in der Simulation zeitgleich mit dem Ereignis aus den Messdaten reproduziert werden, allerdings ist die simulierte Wassermenge in der Summe (Entlastung Sim Grundeinstellung) deutlich geringer, als es die Daten der PDV zeigen (Entlastung PDV). Mit Nachlassen des Regens am 18. Januar geht die abflusswirksame, hydraulische Menge in der Simulation sofort zurück. Der mehrtägige Nachlauf vom 19.01. bis 21.01. wird in der Simulation nicht abgebildet.

### **Schritt 2: Anpassung der Niederschlagsdaten**

Nachdem mit den Grundeinstellungen in der Simulation im Schritt 1 noch kein ausreichend genaues Ergebnis zu erzielen ist, wird weiter nach einer Lösung zur Verbesserung gesucht. Es muss ein Ansatz gefunden werden, den Verlauf der gemessenen Werte aus der PDV besser nachzubilden. Besonders der zum Teil tagelange Nachlauf (19.-21.01.) bei einem Entlastungsereignis wie in Abbildung 109, muss besser erfasst werden. Dieser Nachlauf des Abflusses kann auf ein hohes Fremdwasservorkommen im Kanalnetz Homburg-Bröl zurückgeführt werden.

Einer der ersten Ansätze zur Modellkalibrierung ist eine Anpassung der Niederschlagsdaten. Ziel dieser Anpassung soll sein, für Zeitpunkte in denen ein erhöhter Fremdwasserzufluss (im Regenfall) vorhanden ist, die Zuflüsse zum Kanalnetz so weit zu erhöhen, bis die Nachläufe in den Entlastungen auch in der Simulation im vollen Umfang erreicht werden. Zusätzlich soll das Speicherverhalten einer PT1-Strecke<sup>33</sup> eine Verbesserung im Nachlauf erzielen.

Diese Methode ist sehr unflexibel und zeigt nach ersten Tests keine Verbesserung der Ergebnisse. Über die Wahl geeigneter Parameter wäre es möglich gewesen, für jedes Regenereignis eine brauch-

<sup>33</sup> Eine PT1-Strecke hat ein proportionales Übertragungsverhalten mit Verzögerung 1. Ordnung.

bare Anpassung der Simulation an die Messdaten zu erzeugen, aber dieser Ansatz beinhaltet zwei fundamentale Nachteile:

- Das Modell wäre um einen zusätzlichen mathematischen Systemblock erweitert worden, für den eine technische Entsprechung nur schwierig darstellbar ist. Damit wird eine Forderung an technische Simulationsmodelle nicht erfüllt, denn diese Modelle sollen in allen Elementen Abbildungen der Realität sein.
- Die für ein einzelnes Regenereignis ermittelten Parameter sind nicht auf andere Ereignisse übertragbar. Es wäre also für jeden Regen eine neue Bestimmung der Simulationsparameter erforderlich gewesen. Die Übertragbarkeit des Modells auf veränderte Rahmenbedingungen wäre damit nicht gegeben.

Ein weiterer Ansatz zur Optimierung liegt in der Anpassung der Parameter im Modell für die Abflusswirksamkeit der befestigten und unbefestigten Flächen. Diese dienen jedoch eher zur Feinkalibrierung, wenn die Grundsimulation nur noch minimal angepasst werden muss. Aufgrund der fehlenden Wassermenge in der Simulation kann mit der Veränderung der Parameter der Abfluss in seiner zeitlichen Wirksamkeit, aber nicht in der Menge angepasst werden. Diese Kalibrierung führt somit an dieser Stelle ebenfalls nicht zum Ziel.

### ***Schritt 3: Einbeziehung des Grundwasserspiegels***

Nachdem die Anpassung der Niederschlagsdaten und der Parameter nicht den gewünschten Erfolg bringen, muss ein Verfahren gefunden werden, das flexibel anwendbar und nicht zu aufwändig in der Umsetzung ist.

Bei den ersten Durchläufen liegt häufig eine große Differenz zwischen der simulierten und der real gemessenen Wassermenge im System. Das Modell simuliert zu geringe Wassermengen. Ursache hierfür sind zu geringe Fremdwassermengen in der Simulation. Für Ansätze zu einer weiteren Vorgehensweise wird das Thema Fremdwasser deshalb genauer untersucht.

#### ***Fremdwasser***

---

Die Höhe des Fremdwasseraufkommens beim Aggerverband liegt im Mittel bei 24,2 Mio. m<sup>3</sup>/a. Die Berechnung erfolgt über die Bestimmung der Jahresschmutzwassermenge, die mit Hilfe der Jahresabwassermenge in den Kläranlagen bei Trockenwetter ermittelt wird [SCHEUER, L.; SCHOLEMANN, H. 2004<sup>34</sup>]. Das Fremdwasser begünstigt die Selbstreinigung des Abwassersystems, belastet aber hydraulisch die Kläranlagen, Kanalnetze und Sonderbauwerke zusätzlich.

Oberirdische Gewässer werden vor allem durch vermehrte Emissionen aus dem Kanalnetz und der KA belastet, denn ein erhöhter Fremdwasserabfluss führt zu einer hydraulischen Mehrbelastung. Kanalnetz und die KA entlasten häufiger und länger Abwasser ins Gewässer, wie es auch bei Szenario 4 der Fall ist. RÜB entlasten vorbehandeltes Abwasser in den Bachlauf, was zu einem Eintrag von toxisch wirkenden Stoffen (z.B. Stickstoffverbindungen) führen kann.

Das Fremdwasser dringt zum Teil über schadhafte Haltungen und Schächte in den Kanal ein. Das bedeutet:

---

<sup>34</sup> Konzeption zur Fremdwasserbeseitigung beim Aggerverband. 22. Bochumer Workshop, Niederschlagswasserbehandlung, Bochum

Der Niederschlag versickert im Boden und wird zu Grundwasser. Dieses wird durch Infiltration ins Kanalnetz als Fremdwasser wirksam!

Dieses Eindringen, verursacht durch Grundwasser, gehört zu der am schwierigsten zu bestimmenden Komponente des Fremdwassers [FRANZ ET AL. 2008<sup>35</sup>].

Zur weiteren Analyse dieses Zusammenhangs wird das Grundwasser im Einzugsgebiet der KA näher untersucht. Als Grundwasserspiegel-Messung wird eine vorhandene Füllstandsmessung in einem Brauchwasserentnahmeschacht auf der Kläranlage verwendet.

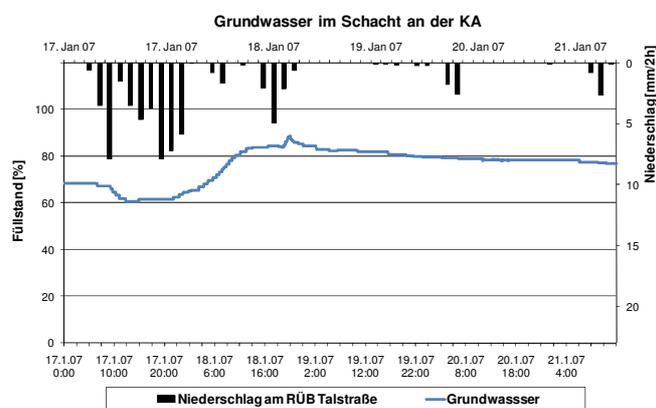


Abbildung 110: Wasser im Grundwasserschacht

In Abbildung 110 ist der Wasserstand im Grundwasserschacht an der KA für den Zeitraum des Szenarios 4 aufgetragen und auf der oberen Achse ist der dazugehörige Niederschlag dargestellt. Der Grundwasserspiegel steigt nach Ende des ersten Regenzyklus am 18.01. an und bleibt bis zum 22. Januar wirksam. Die Grundwasserdaten werden für die ausgewählten Szenarien, ab 2007, in die Simulation eingearbeitet.

### Grundwasserimport und Vorverarbeitung

Aufgrund der großen Bedeutung des Grundwasserspiegels für die Simulation wird an dieser Stelle auf die Einbindung der Grundwasserdaten in die Simulation eingegangen.

Diese Grundwasserdaten liegen im Rohformat als Füllstand in Prozent des Grundwasserschachtes an der KA Homburg-Bröl vor. Die Information muss zur Einbindung in die Simulation individuell für die Einzugsgebiete der jeweiligen RÜB umgerechnet werden. Dieses Vorgehen ist aus technischen Gründen erforderlich, denn bei identischem Grundwasserstand ist in den einzelnen Gebieten der RÜB das Kanalnetz in einem unterschiedlichen Zustand (z.B. undicht) und das Grundwas-

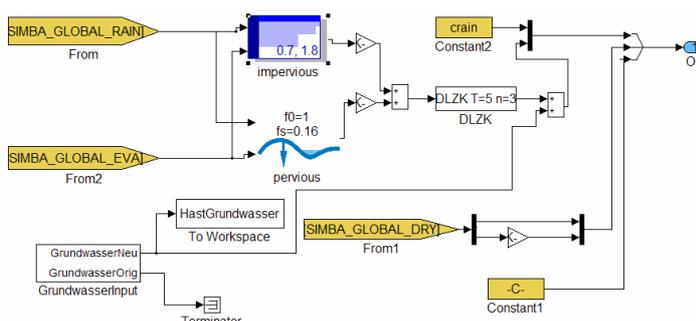


Abbildung 111: Untersystem Grundwasser für das RÜB Hast in SIMBA®

<sup>35</sup> Analyse fremdwasserbeeinflussender Faktoren mittels multidimensionaler Skalierung. KA Korrespondenz Abwasser, Abfall. 2008 (55), Nr. 5

ser dringt verschieden stark in das Netzwerk ein. Weiterhin ist der Einfluss des Grundwassers zusätzlich von der lokal unterschiedlichen Einbautiefe des Kanals im Boden abhängig.

Die Grundwasserinformation wird im Modell in einem lokalen Untersystem des jeweiligen RÜB in SIMBA® eingelesen und verarbeitet.

In der Abbildung 111 ist das Untersystem „Grundwasser“ für das RÜB Hast dargestellt.

Der Grundwasserimport „GrundwasserInput“ geschieht in einem Untermodul „DB Import Hast Grundwasser“ (Abbildung 112).

Nach dem Datenimport (DB Import) gelangen die Daten in das Modul „Fcn“, wo folgende Berechnung durchgeführt wird:

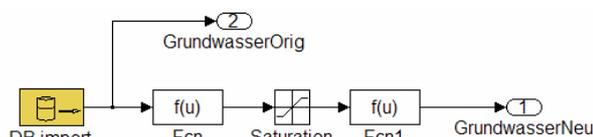


Abbildung 112: Grundwasserdaten Importmodul „DB Import Hast Grundwasser“

$$Grundwasser = \frac{h_i}{100} H_{\max} - H_K$$

#### Formel 1: Gewichtetes Grundwasser

Im Modul „Fcn1“ erfolgt dann folgende Berechnung:

$$Fremdwasser = C * \sqrt{g * Grundwasser} = C * \sqrt{g * \left( \frac{h_i}{100} H_{\max} - H_K \right)}$$

#### Formel 2: Fremdwasserberechnung

Die Konstante „C“ wird für jedes Becken separat ermittelt, da der Fremdwassereinfluss an den RÜB unterschiedliche Gewichtungen aufweist. Für RÜB Hast wird beispielsweise empirisch der Wert 1500 für die Konstante C ermittelt.

Grundwasser = Einfluss des Grundwassers, bezogen auf die Einbautiefe des Kanals

C = Konstante, mit der individuell der Einfluss des Grundwassers auf die Fremdwassermenge im Gebiet des entsprechenden RÜBs angepasst werden kann

g = Erdbeschleunigung = 9,81 m/s<sup>2</sup>

hi = Füllstand des Grundwasserschachtes in %

H<sub>max</sub> = 100 % Höhe innerhalb des Grundwasserschachtes entsprechen 4,93 m

H<sub>K</sub> = Festgelegte untere Kante des Kanals

Nach dieser Berechnung wird das Fremdwasser mit dem Niederschlagswasser zu den Zuflusswerten aus der Eingangsdatenbank der Simulation addiert. Ausgangspunkt für diesen Ansatz war die Modellvorstellung, dass die Infiltration von Fremdwasser in den Kanal als laminare Strömung erfolgt: Der geodätische Druck, proportional der Höhe des Grundwassers, bestimmt die Wassermenge, wobei der Zusammenhang mit der Fließgeschwindigkeit und damit mit dem Volumenstrom, gemäß der Bernoullischen Gleichung, eine Wurzel-Beziehung ist.

Abbildung 113 zeigt ein Simulationsergebnis mit Szenario 4, diesmal unter Berücksichtigung der Grundwasserdaten zur Berechnung des Fremdwassers im Kanal. Als Referenz dienen die Messergebnisse des Entlastungsereignisses am RÜB Hast. Deutlich ist eine Verbesserung des Simulationsergebnisses (grün) unter Einbeziehung des Fremdwassers gegenüber der Simulation im Grundzustand (pink) zu erkennen.

Dieses Ergebnis zeigt eine deutliche Verbesserung der Simulation. Der Pegel des Grundwassers im Schacht an der KA enthält die Information, mit der das in die Kanalisation infiltrierte Fremdwasser in der Simulation abzubilden ist. Auch der Verlauf der Entlastung im Nachlauf vom 17.01. bis 21.01. kann gut nachgebildet werden.

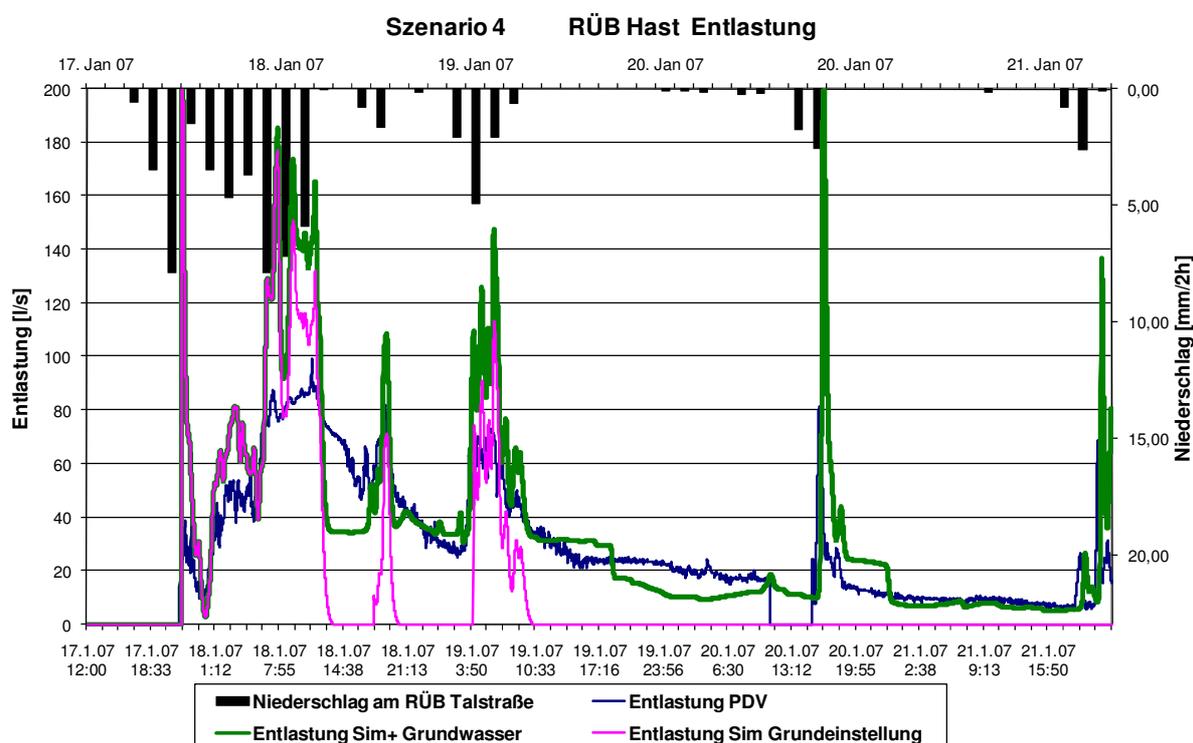


Abbildung 113: Entlastung RÜB Hast, Vergleich PDV-Daten und simulierte Werte mit und ohne Grundwasserdaten

Die Simulation mit Grundwasserdaten verhält sich jedoch in der Anfangsphase, wenn der Regen bei einem neuen Ereignis im Kanal erstmalig wirksam wird, noch nicht optimal. Bei jeder Niederschlagspitze folgt eine Entlastungspitze am RÜB, die in der Simulation zu groß ist. Dieses Verhalten wird in einem weiteren Arbeitsschritt mit Hilfe der Feinkalibrierung im Modell angepasst.

#### Schritt 4: Anpassung der Modellparameter

In Schritt 3 wird noch nicht berücksichtigt, dass ein Kanalnetz-Modell in SIMBA® mit Hilfe einer Feinkalibrierung durch Anpassung der Modellparameter optimiert werden kann. Es handelt sich dabei um die Parameter zur Charakterisierung des Regenablaufes auf befestigten und unbefestigten Flächen im Einzugsgebiet des jeweiligen Regenüberlaufbeckens.

Diese Parameter werden im Schritt 4 mittels des Simplex-Verfahrens<sup>36</sup> automatisch angepasst und im Modell eingestellt. Das Ergebnis dieser angepassten Simulation zeigt die folgende Grafik. Wieder wird das Szenario 4 am RÜB Hast dargestellt.

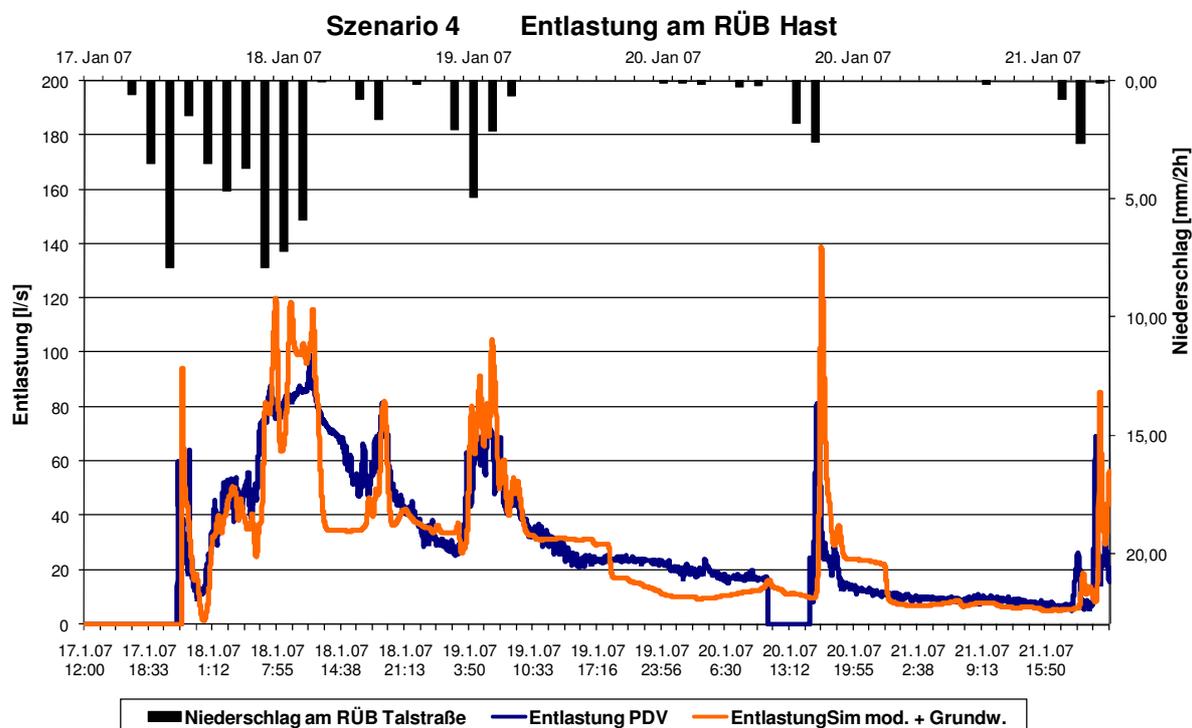


Abbildung 114: Simulation mit modifizierten Modellparametern und Grundwasserinformation

Die Entlastung des Beckens, simuliert mit Informationen des Grundwasserspiegels und angepassten Parametern im Modell, zeigt nun eine sehr gute dynamische Übereinstimmung mit den Messdaten aus der PDV. Auch die berechneten Wassermengen für dieses Szenario weisen nur eine geringe Abweichung zu den Messdaten von 6 % auf. (Die Stufen 19.01. ca. 18:00 Uhr und 20.01. ca. 20:00 Uhr in der simulierten Kurve sind auf Wasserentnahmen im Grundwasserschacht zurückzuführen, das als Grundlage für das Fremdwasser herangezogen wurde.)

Die in Schritt 4 durchgeführte Feinabstimmung der Modellparameter bringt gegenüber Schritt 3 (Einbeziehung von Grundwasser) noch einmal eine deutliche Verbesserung. Die zum Teil überhöhten Spitzen können mit Einstellung der Parameter optimiert werden.

In der Simulation des Kanalnetzverhaltens, unter Berücksichtigung der Grundwasser-Information und in Verbindung mit den modifizierten Modellparametern, können die besten Simulationsergebnisse erzielt werden. Nicht nur die Dynamik der simulierten Ganglinie wird gut realisiert, auch die Quantität der entlasteten Menge in der Simulation stimmt sehr gut mit der Menge aus den PDV-Daten überein, wie die Aufstellung der entlasteten Gesamtmengen am RÜB Hast, für das Szenario 4, in Tabelle 11 belegt.

<sup>36</sup> Iterativ-Methode, d.h. in mehreren Rechenschritten entwickelt dieses Verfahren eine optimale Lösung und ist besonders gut zur Implementierung auf Computern geeignet.

**Tabelle 11: Entlastete Gesamt mengen am RÜB Hast im Szenario 4 - Darstellung der Verbesserung der Simulation über die vier Optimierungsschritte.**

	Referenz	Schritt 1	Schritt 3	Schritt 4
Basis des Ergebnisses	PDV Messungen	Simulation Grundzustand	Simulation Grundzustand + Grundwasser	Simulation modifiziert + Grundwasser
Entlastungsmenge	11.103 m <sup>3</sup>	5.785 m <sup>3</sup>	13.191 m <sup>3</sup>	10.412 m <sup>3</sup>
Abweichung zur Referenz	0 %	- 48 %	+19 %	- 6%

In dieser Tabelle ist die stetige Verbesserung der Simulationsergebnisse am Beispiel der entlasteten Gesamtmenge gut zu erkennen. Im Grundzustand (Schritt 1) fehlen der Simulation, bezogen auf die Messdaten als Referenz, 48 % der in der Realität entlasteten Wassermenge. In Schritt 3 wird die Grundwasserinformationen hinzugenommen, woraufhin die Wassermenge die Referenz um 19 % übersteigt. In Schritt 4 kann das Simulationsergebnis bis auf eine geringe Abweichung von 6 % an den Referenzwert angenähert werden.

#### Weitere Ergebnisse in der Kanalnetz-Simulation

In den folgenden Grafiken werden weitere Simulationsergebnisse aus den Szenarien fünf bis neun vorgestellt. Damit wird nachgewiesen, dass der Modellansatz auch auf andere Ereignisse übertragbar ist. Berechnet werden Entlastungsereignisse an Regenüberlaufbecken aus den Teilsträngen Nümbrecht sowie Waldbröl.

Es werden jeweils die hydraulischen Messdaten aus dem Prozessdatensystem des Aggerverbands im Vergleich zu den simulierten Daten (mit Grundwasserinformation und angepassten Parametern) aus SIMBA® gezeigt. Zur Vervollständigung der Informationen über diese Regenereignisse werden die Niederschlagsdaten ebenfalls mit aufgeführt (obere Achse). Die Niederschlagswerte stammen von einer Pluvio-Messtation am RÜB Talstraße.

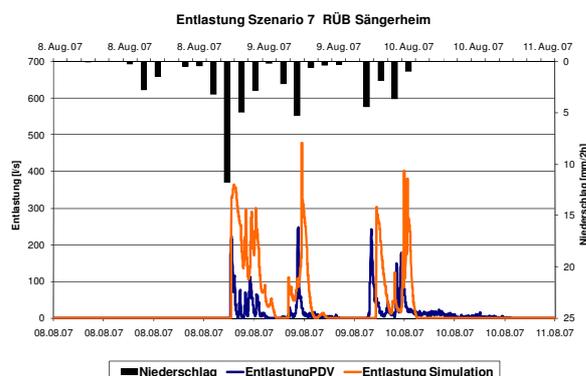


Abbildung 115: Szenario 7 RÜB Sängersheim

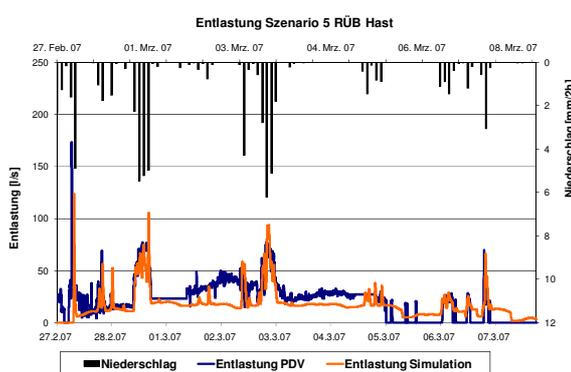


Abbildung 116: Szenario 5 RÜB Hast

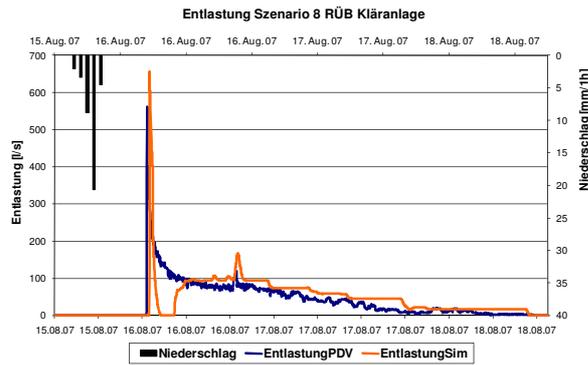


Abbildung 117: Szenario 8 RÜB Kläranlage

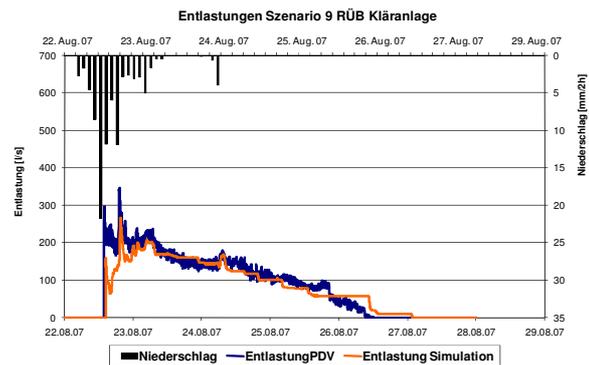


Abbildung 118: Szenario 9 RÜB Kläranlage

Die Simulationsverläufe der Szenarien 5 bis 9 zeigen – verglichen mit den gemessenen PDV-Daten – sehr gute Ergebnisse. Der reale Entlastungsverlauf an den RÜB konnte im Modell in der Dynamik und auch in den Absolut-Werten gut nachgebildet werden.

Die Simulation eines Modells dient der Erkenntnisgewinnung über das reale System und wird im Rahmen des KANNST Projekts weiter für die experimentelle Untersuchung von integrierten Regelstrategien für Kanalnetz und Kläranlage eingesetzt - ohne dabei in die wirklichen Systeme eingreifen zu müssen.

Als ein wichtiger Schritt im KANNST Projekt wurde dieser Stand der Simulation im Sommer 2007 von der Bezirksregierung Köln als Basis für die Entwicklung und den Test der Regelungsstrategie akzeptiert und genehmigt.

## 9 Entwurf der Steuerstrategie und der Verbundsteuerung<sup>37</sup>

Für die Regelungsstrategie im KANNST-Projekt wurde Priorität auf die Entwicklung eines hydraulischen, volumenbezogenen Konzepts gelegt. Die durch die Regelung optimierten RÜB Drosselwassermengen setzen vorhandenes Potenzial im Kanalnetz frei und vermeiden Entlastungen, was bereits den Schutz des Gewässers aktiv fördert. Das in der Abbildung 119<sup>38</sup> dargestellte Konzept der Verbundsteuerung wird dabei jedoch nicht vernachlässigt.

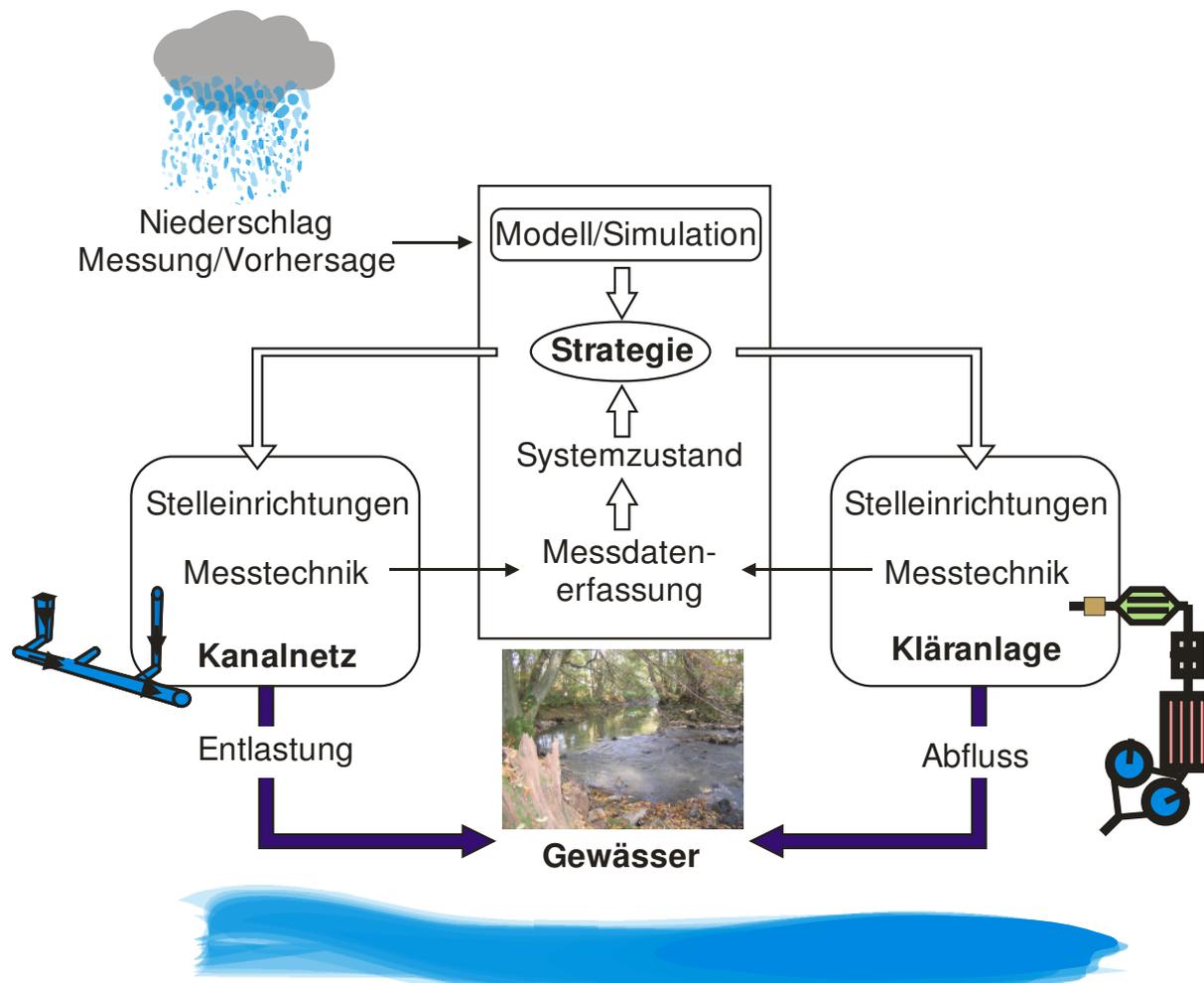


Abbildung 119: Schema einer integrierten Verbundsteuerung nach Grüning [2002], erweiterte Darstellung

Das Schema der Verbundsteuerung berücksichtigt als wichtige Faktoren die Vorhersage und Messung von Niederschlagsdaten, die Nutzung von Modellen und Simulationen sowie Online-Messdaten von Kläranlage und Kanalnetz. Diese Elemente fließen neben den hydraulischen Betrachtungen ebenfalls in die Strategie des KANNST Projekts mit ein.

<sup>37</sup> Quelle: „Wasser in der Gesellschaft“, T. Haag

<sup>38</sup> Ein Modell zur simultanen Bewirtschaftung von Kanalnetz und Kläranlage unter Berücksichtigung resultierender Gewässerbelastung. Gesellschaft zur Förderung des Lehrstuhls für Siedlungswasserwirtschaft und Umwelttechnik an der Ruhr-Universität Bochum. Schriftenreihe Siedlungswasserwirtschaft Bochum, Band 42

Die Frachten bzw. Abwasserinhaltsstoffe werden im ersten Schritt der Regelungsstrategie noch nicht berücksichtigt. Aufgrund der Komplexität des Gesamtvorhabens haben sich die Projektbeteiligten darauf geeinigt, zuerst einen hydraulischen Regler zu realisieren.

Es soll ein einfach nachvollziehbares Regelungskonzept für den praktischen Einsatz im kommunalen Kanalnetz entwickelt werden. Das Ergebnis der Forschung ist dabei für alle Beteiligten transparent und zugänglich umzusetzen und fördert dadurch die Akzeptanz, z.B. bei dem Betriebspersonal oder den Genehmigungsbehörden. In der Umsetzung von Forschung, die naturgemäß noch nicht dem Stand der Technik entspricht, ist deshalb eine sensible Vorgehensweise gefragt.

Ein Hauptpunkt für die hydraulische Optimierung im Kanalnetz Homburg-Bröl ist, bezogen auf die Elemente der Regelungsstrategie, der Drosselabfluss der einzelnen Speicher, der Entlastungen und Füllstände, abhängig vom vorhergesagten Niederschlag. Für das KANNST Projekt bedeutet dies die Anpassung der RÜB Drosselmengen für einen geregelten Betrieb. Bisher sind die RÜB Drosselmengen festgelegte Werte entsprechend einer Netzplananzeige (2005). Dort sind im Kanalnetz Homburg-Bröl zulässige Grenzwerte für die hydraulische Drosselung der Abwasserabflussmengen eingetragen, die von der BZR Köln genehmigt sind.

Zuerst wird überprüft, ob das Kanalnetz im Istzustand die geforderten Grenzwerte an den RÜB einhält. Die Überprüfung ist positiv, so dass keine Änderungen am Istzustand notwendig waren.

Im Anschluss daran werden neue, maximal mögliche Drosselwassermengen für die Regelung der RÜB ermittelt und festgelegt. Damit wird der Stellbereich für zukünftige Regel- und Steuereingriffe festgelegt. Die Drosselmengen wurden zuerst in einer hydrologischen Berechnung<sup>39</sup>, ausgehend vom technisch Machbaren bzw. vom baulich Möglichen, errechnet. Das bedeutet, die Rohrdurchmesser am Ablauf der RÜB wurden als Grundlage für die Berechnung der maximalen Wassermenge herangezogen. Technische Gegebenheiten, wie beispielsweise MID-Vorrichtungen, grenzten diese Maximalwerte weiter ein.

Diese Werte sind die Ausgangsbasis für die weiteren Untersuchungen in der Simulation.

Diese Obergrenzen werden ins Modell des Kanalnetzes eingestellt und zunächst ohne Regelung getestet. Ziel dieser Untersuchungen ist es, die maximal mögliche Grenze der Drosselmengen für die RÜB auch simulationstechnisch hydrodynamisch zu verifizieren, denn die rein hydrologisch bestimmten Werte können im kommunalen Abflusssystem zu Überflutungen der Kanalabschnitte führen, die im Anschluss an das RÜB folgen.

Diese optimale Auslegung der Drosselmengen wird sukzessiv in kleinen Schritten vorgenommen, ausgehend von den physikalischen Obergrenzen. Wenn die Auslastung zu groß ist, so dass der am RÜB durchgeflossene Volumenstrom im Netz eine Überflutung auslöst, muss die Drosselmenge herabgesetzt werden. So kann für jeden Abschnitt und jedes RÜB die optimale Drosselmenge eingestellt werden. Es ist zwar ein Ziel des Projekts, die Entlastungen ins Gewässer zu verringern, dies soll jedoch nicht auf Kosten der am Kanalnetz angeschlossenen Einwohner durchgeführt werden. Denn eine Überflutung des Kanalnetzes mit Austritt von Abwasser aus den Schächten an die Oberfläche, kann große Schäden bzw. Verunreinigungen verursachen. Keime und Schmutzstoffe gelangen so auf

<sup>39</sup> Nach Bernoulli für Berechnungen bei inkompressiblen Strömungen

Straßen oder in Keller und Vorgärten der Anwohner. Entsprechend sorgfältig müssen die Berechnungen durchgeführt werden.

Die in der Tabelle 12 aufgeführten Obergrenzen der Drosselmengen für ein unbelastetes Kanalnetz (rechte Spalte) werden im Rahmen der Forschung als maximal mögliche Mengen ermittelt.

**Tabelle 12: Übersicht der Drosselwassermengen**

	Drosselmengen der RÜB	Plan 2005 = Ist-Zustand	Prognose 2012 Obergrenze belastetes Kanalnetz	Obergrenze unbelastetes Kanalnetz
Waldbröl	RÜB Rommelsdorf	15 l/s	15 l/s	50 l/s
	RÜB Hast	20 l/s	40 l/s	66 l/s
	RÜB Talstraße	40 l/s	55 l/s	70 l/s
	RÜB Kalkofen	60 l/s	65 l/s	80 l/s
	RÜB Oberbreidenbach (Hauptsammler Waldbröl)	15 l/s	15 l/s	20 l/s
Nümbrecht	RÜB Eckenbach	41 l/s	41 l/s	60 l/s
	RÜB Sängerheim	75 l/s	85 l/s	100 l/s
	RÜB Kläranlage	85 l/s	85 l/s	150 l/s*

\*MID erlaubt nur 120 l/s

In der Übersicht sind für die RÜB im Kanalnetz Homburg-Bröl jeweils drei Drosselmengen angegeben. Die Spalte „Plan 2005“ gibt den Ausgangszustand vor. Die Spalte „Obergrenze unbelastetes Kanalnetz“ (orange umrandet) zeigt die neuen Drosselmengen, die bei den gerade beschriebenen Untersuchungen bestimmt worden sind.

Die Spalte „Obergrenze belastetes Kanalnetz“ gibt Werte mit einer höheren Sicherheitsstufe vor. Sie werden aus einer Vorlage des Aggerverbands für die Netzplan-Prognose 2012 entnommen. Für die optimale Ausschöpfung der Kapazitäten des Kanalnetzes stellt sich bei der Ermittlung der maximal möglichen Drosselmengen heraus, dass die aktuelle Belastung des Kanalnetzes durch Niederschlag und Fremdwasser nicht vernachlässigt werden darf, denn der Regen kann je nach Intensität eine Welle im Kanalnetz verursachen, die die Gefahr einer Überflutung des Kanalnetzes zusätzlich verstärkt. Aus diesem Grund werden für die ganzheitliche Regelung des Gesamtsystems die maximalen Drosselmengen, abhängig von der Belastung des Gesamtsystems festgelegt.

Definition „belastetes“ Kanalnetz:

Das Kanalnetz gilt als belastet, wenn die Niederschlagsmenge die eines 1-jährlichen Regenereignisses überschreitet. Als Grundlage dient eine Vorlage nach KOSTRA-Daten des Deutschen Wetterdienstes (DWD), Abteilung für Hydrometeorologie, für das Gebiet Nümbrecht (siehe Tabelle 1). KOSTRA ist ein gebietsabhängiger Starkregenkatalog des DWD.

**Tabelle 13: Niederschlagshöhen für das Gebiet Nümbrecht für ein 1-jährliches Ereignis**

Dauer	Niederschlagshöhe in [mm]
5 Minuten	5,1
10 Minuten	8,2
15 Minuten	10,3
20 Minuten	11,7
30 Minuten	13,7
45 Minuten	15,5
60 Minuten	16,5
90 Minuten	18,4
2 Stunden	19,8
3 Stunden	22,1
4 Stunden	23,9
6 Stunden	26,6
9 Stunden	29,6
12 Stunden	32,0
18 Stunden	34,8
24 Stunden	37,5
48 Stunden	55,0

Der Regen wird im Abstand von 5 Minuten neu eingeschätzt und beurteilt. Wenn ein 1-jährliches Ereignis identifiziert wird, ist der Zustand „belastetes Kanalnetz“ mit den dafür vorgesehenen Obergrenzen für die Drosseln erreicht. Diese Absicherung ist notwendig, um das Kanalnetz nicht zu überlasten und um die Gefahr einer Überflutung zu minimieren.

Die neuen maximalen Drosselmengen stellen wichtige Ausgangswerte für die Regelungsstrategie dar und sind zur Übersicht in der Abbildung 120 in das Kanalnetzschema von Homburg-Bröl eingetragen.

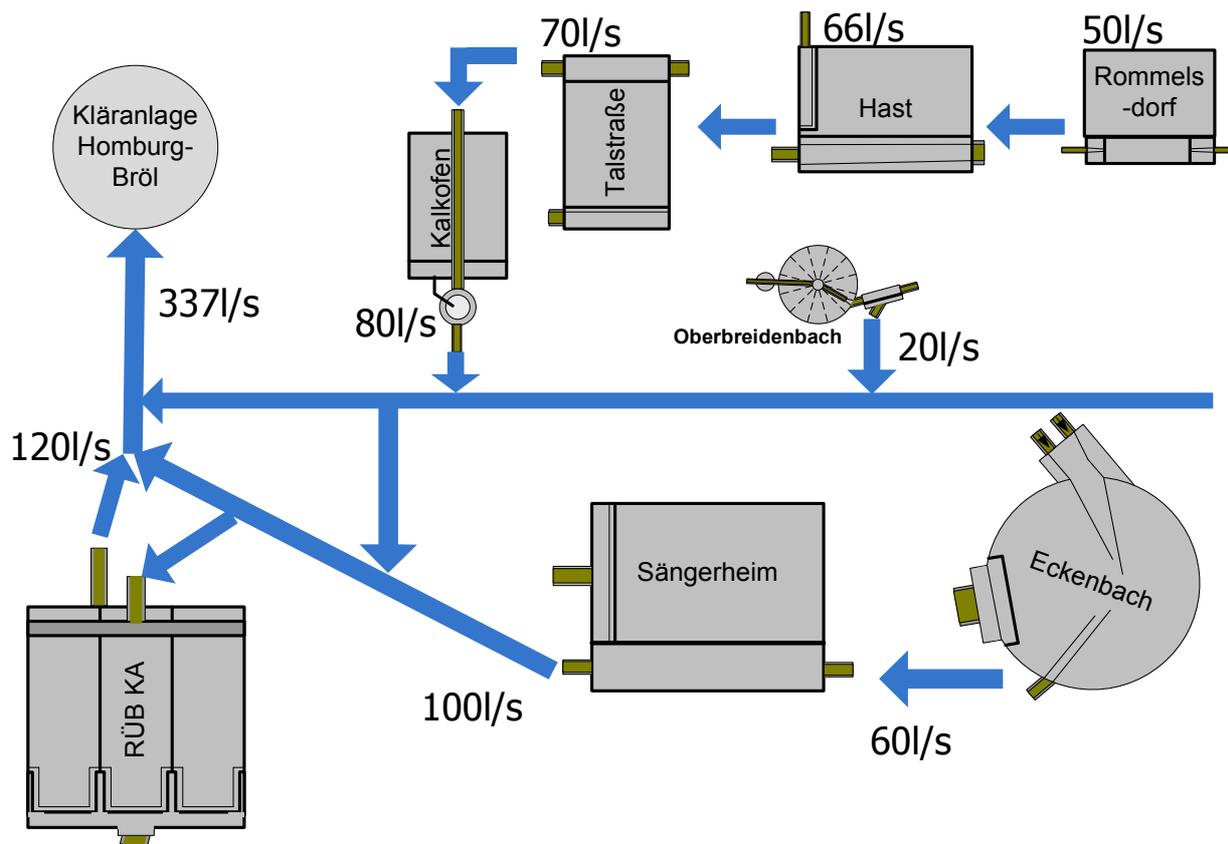


Abbildung 120: Kanalnetz-Schema Homburg-Bröl mit eingezeichneten Drosselwassermengen

Für einen freien hydraulischen Abfluss ist es sinnvoll, die Drosselmengen der RÜB in Fließrichtung zu vergrößern, damit kein Einstau erzeugt wird (50->66->70->80).

Die Drosselwassermenge des RÜB Oberbreidenbach wird nicht geregelt. Es wird aufgrund einer Kosten-Nutzen-Analyse aus der Gesamt-Regel-Strategie herausgenommen. Die Drosselmenge von 20 l/s wird als Sollwert für die lokale Steuerung am RÜB vorgegeben.

Die Drosselmenge des RÜB Kläranlage ist nur in der Simulation auf die Angaben in der Tabelle festgelegt. Für den Regler im realen kommunalen Netz ist die Drosselmenge des RÜB KA abhängig von drei Zuläufen der Kläranlage (Nümbrecht, Waldbröl, Pumpstation Elsenroth). Die Mischwassermenge aus dem Strang Nümbrecht wird variabel geregelt, so dass die zugelassene maximale Zulaufmenge der Kläranlage nicht überschritten wird.

Diese maximalen Werte der Drosselmengen werden zur Sicherheit auch unter Einsatz des Reglers in der Simulation getestet. Die Überprüfung ergibt, dass die Drosselmengen hiermit optimal eingestellt sind und es zu keinen unerwünschten Auswirkungen kommt.

## 9.1 Der Zustandsgenerator für die hydraulische Regelung – Stufe 1

Das im KANNST Projekt zu entwickelnde Regelsystem schöpft, unter den vorausgehend beschriebenen Bedingungen und Grenzen die verfügbare Kapazität des Kanalnetzes aus, mit dem Ziel, Entlastungen zu vermeiden oder zumindest zu reduzieren und damit das Gewässer zu schützen.

Im Rahmen der Forschungsarbeiten wird aus dieser Motivation heraus ein umfassendes Konzept für die Regelung des Kanalnetzes entwickelt.

Die ursprüngliche Planung zu Beginn des Projekts, eine Realisierung der Regelung auf Grundlage eines reinen Fuzzy-Reglers durchzuführen, wird aufgrund der Komplexität des Gesamtsystems überarbeitet und um eine übergeordnete Komponente, den Zustandsgenerator, erweitert.

Ein Zustandsgenerator ermöglicht eine übersichtliche und gut strukturierte Umsetzung des Regelungskonzepts, in dem er kontinuierlich den Zustand wichtiger Systemparameter der Faktoren beobachtet und bewertet, die auf das gesamte Abflussgeschehen einwirken (Abbildung 121), wie z.B. der Niederschlag, das Grundwasser oder Bodenbeschaffenheit.

Der Generator ist dafür vorgesehen, den aktuellen Gesamt-Zustand, in dem sich das Kanalsystem befindet, zu erfassen und die nachgeschalteten Fuzzy-Regler zu aktivieren.

Diese Vorgehensweise ermöglicht es, viele Komponenten zu erfassen, aber die eigentliche Regelung einfach zu halten. Denn für jeden Zustand, den der Generator vorgibt, wird im Projekt ein eigener Fuzzy-Regler entwickelt. Diese einzelnen Regler sind übersichtlich strukturiert, da die Systemkomplexität nicht in einem Regler abzubilden ist, sondern sich auf übergeordnete Zustandsregler und jeweils angepasste Fuzzy-Systeme aufteilt.

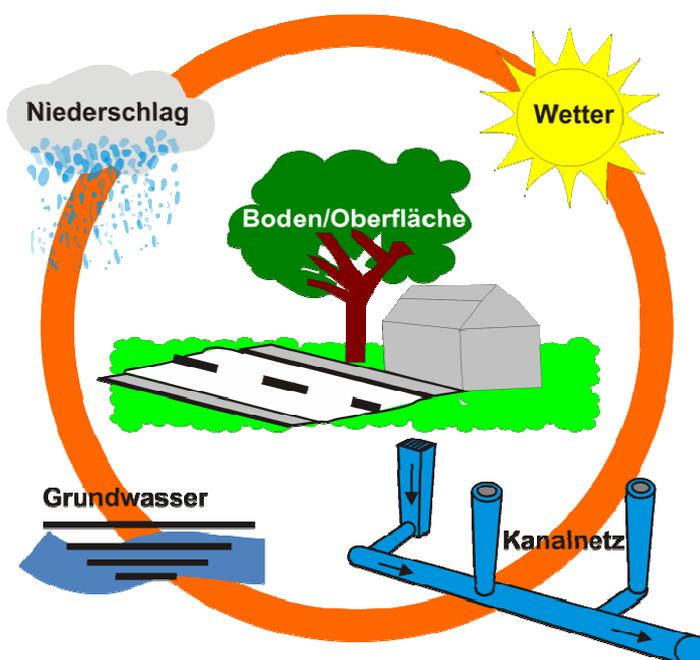


Abbildung 121: Einflussnehmende Faktoren

Der Zustandsgenerator für KANNST beinhaltet acht Zustände, wie in Abbildung 122 dargestellt.

## Zustandsgenerator Stufe 1 - Hydraulische Optimierung

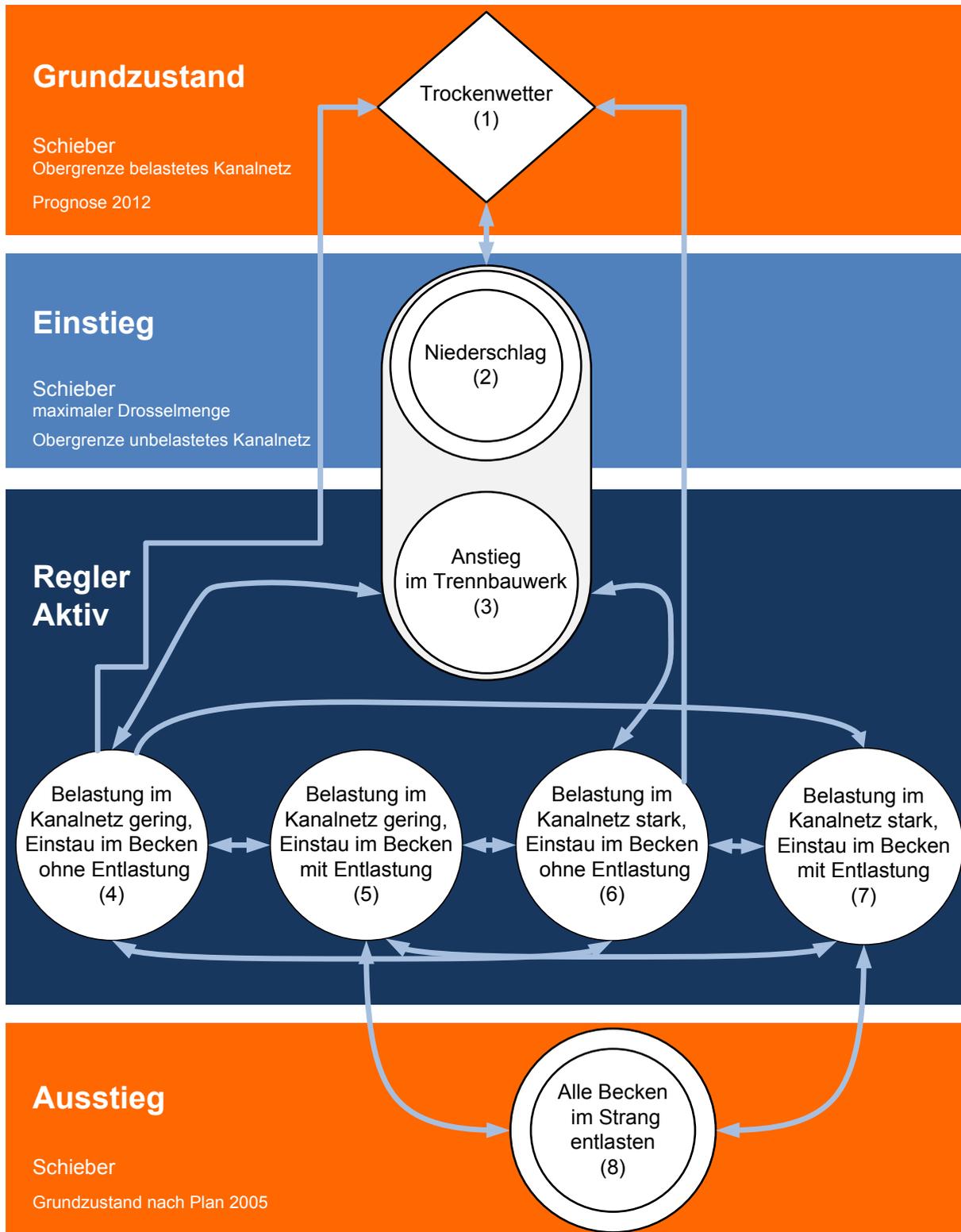


Abbildung 122: Zustandsgenerator KANNST

Hinter jedem dieser Zustände steht ein separates Reglungskonzept, angepasst an die Anforderungen des Kanalsystems. Das bedeutet, für jeden Zustand existiert ein eigener Fuzzy-Regler, der aktiv wird,

wenn der jeweilige Zustand erreicht ist, bzw. wieder inaktiv wird, wenn der Zustand verlassen und durch einen anderen Zustand abgelöst wird.

In der Abbildung 122 sind die Verknüpfungen und Übergänge der Zustände dargestellt. Die Zustände des Generators können dabei in vier Regelsituationen eingeteilt werden.

- Im Zustand 1 befindet sich das System im Grundzustand und alle Schieber an den RÜB sind eingestellt auf die Drosselmenge des belasteten Kanalnetzes nach Prognose 2012.
- Der Einstieg in den aktiven Regelprozess wird mit Zustand 2 und 3 definiert.
- Der Regler geht in den Zuständen 4 bis 7 in die aktive Phase mit variablen Drosselmengen an den RÜB.
- Der Ausstieg aus der Regelung erfolgt mit Zustand 8.

Dieser Zustandsgenerator wird jeweils für Strang Nümbrecht und Strang Waldbröl umgesetzt.

Im Folgenden werden die einzelnen Zustände des Generators aufgeführt und detailliert beschrieben. Die dabei genannten Drosselwassermengen sind in Tabelle 12 vorgestellt worden.

#### Zustand (1) Trockenwetter, $Q_d$ konstant

Hinweis: Dieser Zustand wird mit einsetzendem Niederschlag inaktiv.

Dauer der Trockenphase wird separat erfasst.

Regelung: Schieber sind konstant eingestellt nach dem belasteten Kanalnetz Prognose 2012.

Trockenwetter bedeutet, es fällt kein Niederschlag. Dazu werden zwei Regenschreiber an der Kläranlage Homburg-Bröl und einer am RÜB Talstraße (sowie geplant am RÜB Rommelsdorf) herangezogen. Für einen später zu realisierenden frachtabhängigen Regler wird die Dauer der Trockenphase separat erfasst. So können eventuelle Spülstöße nach langer Trockenzeit frühzeitig erkannt werden.

#### Zustand (2) Niederschlag und Zustand (3) Anstieg im Trennbauwerk, $Q_d$ konstant

Hinweis: Ist bei einsetzendem Niederschlag und/oder Anstieg im TBW aktiv und wird wieder inaktiv sobald sich ein RÜB füllt.

Regelung: Schieber auf neuer maximaler Drosselwassermenge für ein unbelastetes Kanalnetz (Obergrenze unbelastetes Kanalnetz).

Zustand 3 stellt eine zusätzliche Sicherheitsstufe für Zustand 2 dar. Da im Kanalnetz Homburg-Bröl die Volumina der TBW sehr gering sind und sich bei einem Anstieg in diesem Bauwerk auch unmittelbar das RÜB füllt, wurde auf Stufe 3 verzichtet.

Der Zustand 2 wird aktiv mit einsetzendem Niederschlag. Die Drosselwassermengen werden konstant auf die Obergrenzen für das unbelastete Kanalnetz eingestellt.

*Zustand (4) Belastung im Kanalnetz gering, Einstau im Becken ohne Entlastung,  $Q_d =$  Fuzzy high*

---

- Zielgröße:** Hydraulische, volumenabhängige Vergleichmäßigung.
- Hinweis:** Zustand ist mit Beginn des Einstaus in einem Regenüberlaufbecken aktiv.
- Regelung:** Geregelte Drosselwassermengen mit neuem Maximalwert für ein unbelastetes Kanalnetz.
- Niederschlag:** Stärke des Niederschlags ist geringer als ein 1-jährliches Ereignis bzw. der Niederschlag liegt in Form von Schnee bei einer Temperatur unter 3°C vor (keine Schneeschmelze).

In diesem Zustand (4) ist ein Fuzzy-Regler mit dem Ziel der hydraulischen, Volumen bezogenen, Vergleichmäßigung aktiv. Der Zustand beginnt mit dem Einstau eines oder mehrerer Becken.

Die Regelung verteilt das Mischwasser gleichmäßig auf die freien Kapazitäten der Regenüberlaufbecken im Kanalnetz. In diesem Zustand sind die neuen Drosselwassermengen für ein unbelastetes Kanalnetz aktiv (Obergrenze unbelastetes Kanalnetz). Der Regler kann dann zwischen der Drosselwassermenge 5 l/s und dem vorgegebenen Maximalwert eingestellt werden.

**Hinweis:** Das Wasser kann nicht von einem vollen Becken in ein – nach Fließrichtung – davor liegendes, leeres Becken gepumpt werden. Der Ausgleich ist lediglich in der natürlichen Fließrichtung zur Kläranlage möglich. Es kann aber ggf. verhindert werden, dass sich ein volles Becken weiter füllt indem ein noch nicht volles Becken verstärkt eingestaut wird. Es erfolgt ein Ausstieg aus diesem Zustand, wenn:

- Kein Einstau im Becken mehr vorhanden ist
- Das Kanalnetz die Definition für ein „belastetes“ Kanalnetz erreicht
- Ein Becken beginnt zu entlasten



Mit Hilfe eines Wetter-Radar-Schicht-Systems (Abbildung 123) am RÜB Talstraße kann unterschieden werden, ob der Niederschlag in Form von Regen oder Schnee gefallen ist. Im Falle von Schnee, bei einer Temperatur unterhalb von 3°C, wird von einer verzögerten Wirkung des Niederschlags im Kanalnetz ausgegangen. Bei einem Schneefallereignis, das die Niederschlagsmenge eines 1-jährlichen Ereignisses überschreitet, jedoch bei einer Temperatur von unter 3°C liegt, wird das Kanalnetzsystem nicht sofort als „belastet“ definiert. Erst mit einsetzender Schneeschmelze und gleichzeitigem Regen würde das Kanalnetz als „belastet“ betrachtet und die Regelung würde mit verringerten Drosselwassermengen arbeiten (Obergrenze belastetes Kanalnetz).

**Abbildung 123: Wetter-Radar-Schicht-System**

*Zustand (5) Belastung im Kanalnetz gering, Einstau im Becken mit Entlastung,  $Q_d =$   
Fuzzy high*

---

- Zielgröße:** Entlastungen der RÜB vermindern, abhängig von der Entlastungsmenge.
- Hinweis:** Der Zustand ist mit Beginn der Entlastung eines Regenüberlaufbeckens aktiv.
- Regelung:** Geregelte Drosselwassermengen mit den neuen Maximalwerten für ein unbelastetes Kanalnetz.
- Niederschlag:** Die Niederschlagsintensität ist geringer als ein 1-jährliches Ereignis, bzw. der Niederschlag liegt in Form von Schnee bei einer Temperatur unter 3°C vor.

Dieser Zustand wird aktiv, sobald ein RÜB (jeweils für den Teilstrang Nümbrecht oder Waldbröl) beginnt zu entlasten. Diese Fuzzy-Regelung betrachtet neben den Füllständen der Becken auch die Entlastungsmenge eines oder mehrerer Becken. Das Hauptziel der Regelung ist die hydraulische Minimierung der Abschläge, um den Eintrag in das Gewässer zu minimieren. In diesem Zustand sind die neuen Drosselwassermengen für ein unbelastetes Kanalnetz aktiv (Obergrenze unbelastetes Kanalnetz). Der Regler kann Ablaufmengen zwischen der Drosselwassermenge 5 l/s und der neuen maximalen Menge einstellen.

Auch in diesem Zustand 5 gilt, identisch mit Zustand 4, dass die Regelung mit den Drosselmengen-Obergrenzen für ein unbelastetes Kanalnetz nur aktiv bleibt, solange der Niederschlag als ein unter 1-jährliches Ereignis klassifiziert wird.

*Zustand (6) Belastung im Kanalnetz stark, Einstau im Becken ohne Entlastung,  $Q_d =$   
Fuzzy low*

---

- Zielgröße:** Hydraulische, volumenabhängige Vergleichmäßigung
- Hinweis:** Der Zustand ist mit Beginn des Einstaus in einem Regenüberlaufbecken bei einer starken Belastung des Kanalnetzes aktiv. Die Stärke des Niederschlags wird nach KOSTRA-Daten des Deutschen Wetterdienstes eingeordnet.
- Regelung:** Regelung mit den verringerten Drosselwassermengen für ein belastetes Kanalnetz (Obergrenze belastetes Kanalnetz).
- Niederschlag:** In diesem Zustand liegt die Intensität des Niederschlags oberhalb eines 1-jährlichen Ereignisses bzw. es setzt die Schneeschmelze ein.

Der Zustand 6 ist zu vergleichen mit dem Zustand 4. Das Ziel in diesem Zustand ist die gleichmäßige Verteilung des Mischwassers auf die vorhandenen Beckenvolumina. Der Unterschied zu Zustand 4 liegt in den verwendeten Drosselwassermengen. Hier gelten die Obergrenzen für ein belastetes Kanalnetz. Diese Drosselwassermengen sind niedriger als die für das unbelastete Netz. Sie bieten die Möglichkeit und die Sicherheit, die freien Kapazitäten im Netz zu nutzen, ohne das Kanalsystem zusätzlich zu belasten. Der Fuzzy-Regler kann Ablaufmengen zwischen der Drosselwassermenge 5 l/s und der Obergrenze für ein belastetes Kanalnetz einstellen.

*Zustand (7) Belastung im Kanalnetz stark, Einstau im Becken mit Entlastung,  $Q_d =$   
Fuzzy low*

---

- Zielgröße:** Entlastungen der RÜB vermindern, abhängig von der Entlastungsmenge.
- Hinweis:** Dieser Zustand ist mit Beginn der Entlastung eines Regenüberlaufbeckens bei einer starken Belastung des Kanalnetzes aktiv.
- Regelung:** Regelung mit den verringerten Drosselwassermengen für ein belastetes Kanalnetz (Obergrenze belastetes Kanalnetz).
- Niederschlag:** Die Intensität des Niederschlags liegt oberhalb eines 1-jährlichen Ereignisses bzw. Beginn der Schneeschmelze.

In diesem Zustand hat der Schutz der/des entlastenden RÜB oberste Priorität, geregelt in Abhängigkeit von der Entlastungsmenge und mit dem Ziel, die Gesamt-Abschlagsmenge des Systems zu minimieren. Dieser Zustand 7 ist identisch mit Zustand 5, mit Ausnahme der Drosselwassermenge. Hier gelten aus Sicherheitsgründen die Obergrenzen für ein belastetes Kanalnetz.

*Zustand (8) Alle Becken im Strang entlasten;  $Q_d$  konstant*

---

- Hinweis:** Das Kanalnetz ist sehr hoch belastet und es ist damit kein Potenzial mehr für die Regelung vorhanden.
- Regelung:** Ausstieg der Regelung. Schieber konstant, mit lokaler Steuerung der Drosselmengen laut Prognose 2012.

Für die Regelung gibt es einen Einstieg, einen aktiven Zustand und einen Ausstieg. Der Ausstieg ist sinnvoll, sobald kein freies Potenzial im Kanalnetz mehr vorhanden ist, das für eine Verteilung des Mischwassers genutzt werden könnte. Dies gilt jeweils separat für den Teilstrang Nümbrecht und den Strang Waldbröl. Wenn alle Becken in einem Teilstrang entlasten, wird das Kanalnetz nicht mehr zentral geregelt. Die Drosselschieber werden lokal auf die Drosselmengen laut Prognose 2012 fest eingestellt. Für den Zeitpunkt, an dem nicht mehr alle RÜB gleichzeitig entlasten, wird die Regelung wieder aufgenommen.

## 9.2 Fuzzy-Regler

Für die Zustände 1 bis 3 sowie 8 gelten feste Drosselmengen. Auf Fuzzy-Regler die für die Zustände 4 bis 7 entwickelt wurden, wird in diesem Kapitel im Detail eingegangen.

Als ein kostengünstiges und besonders effektives Werkzeug für die Optimierung von Prozessen bietet sich die Computational Intelligence (CI) an. CI beinhaltet Verfahren und Methoden zur numerischen Wissensverarbeitung. Dazu gehören unter anderem Neuronale Netze (NN), Fuzzy-Logik sowie Evolutionäre Algorithmen.

Intelligente, selbstlernende und vorausschauende Optimierungssysteme der CI können bis zu 20 % an versteckten Reserven auf einer KA aktivieren. CI-Anwendungen haben, wie prädiktive Belüftungsregelung oder Prozesswasserdosierung auf kommunalen Kläranlagen, ihre Effektivität – bei gleichzeiti-

ger Kosten- und Energieoptimierung – bereits in der Vergangenheit bewiesen [Stockmann et al. 2006<sup>40</sup>].

In der Praxis erprobte Methoden der CI, wie NN und Fuzzy-Logik sowie neuere evolutionäre Verfahren, wie z.B. Genetische Algorithmen, bilden die Grundlage für die Erforschung der automatisierten Optimierung der integrierten Betrachtung im KANNST Projekt.

Fuzzy-Logik ist ebenso wie Genetische Algorithmen und Neuronale Netze dem Bereich der Computational Intelligence (CI) zuzuordnen, einem Gebiet der künstlichen Intelligenz (AI). Speziell in der Abwassertechnik kommen CI-Verfahren, wie Fuzzy-Logik und die Neuronale Netze schon seit einem längeren Zeitraum zum Einsatz [BORGELT ET AL. 2003<sup>41</sup>].

Für den Einstieg und als Basis für den Regler wird zunächst einmal die Fuzzy-Logik erläutert.

Unser Alltag ist weitestgehend bestimmt vom Fuzzy-Charakter. Ein großer Teil unserer Sprache nutzt unscharfe Beschreibungen wie „ein guter Abschluss“, „ein schönes Jahr“ oder „warmes Wetter“. Zwischenmenschliche Kommunikation würde durch eine scharfe Abgrenzung von Begriffen an Vielfalt verlieren.

Wissenschaftliche Arbeit, insbesondere die Natur- und Ingenieurwissenschaft, ist stets um präzise Aussagen bemüht [BÖHME 1993<sup>42</sup>]. Fuzzy-Logik beruht auf einer exakten mathematischen Theorie, die in der Lage ist, weite Bereiche des menschlichen Denkens sowie Expertenwissen zu implementieren und mit formalen, unscharfen Methoden zu beschreiben.

Für das Kanalnetz bedeutet dies:

Durchflussstrecken, Komponenten des Kanalnetzes, wie Rohrleitungsabschnitte und Druckleitungen weisen ein extrem nichtlineares und zum Teil zeitvariantes Verhalten auf [LAUZI 1996<sup>43</sup>]. Klassische Verfahren eines linearen Regler-Entwurfs<sup>44</sup> sind daher nicht so gut für die Volumenstrom-Regelung eines Kanalsystems geeignet, wie Fuzzy-Logik, da die Vorgänge im System mathematisch nur schwer, bzw. unzureichend beschrieben werden können.

Ist keine lineare, zeitinvariante Übertragungsfunktion zur Beschreibung der Regelstrecke<sup>45</sup> formulierbar, so bietet sich der Einsatz von Fuzzy-Regelungen an – sprachlich formuliertes Wissen wird in eine mathematische Form übertragen [NIEMANN 2002<sup>46</sup>].

<sup>40</sup> Optimierung einer kommunalen Kläranlage mit modernen Simulationswerkzeugen und Methoden der Computational Intelligence. Magdeburger Wasserwirtschaft, Hefte Abwasserbehandlung Band 5, Magdeburg

<sup>41</sup> Neuro-Fuzzy-Systeme; Vieweg-Verlag 2003

<sup>42</sup> Fuzzy-Logik – Einführung in die algebraischen und logischen Grundlagen, Springer-Lehrbuch, Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg

<sup>43</sup> Einsatzmöglichkeiten von Entscheidungssystemen auf Basis von Fuzzy-Logik zur Steuerung hydraulischer Anlagenkomponenten; 6. Aachener Fuzzy-Symposiums der INFORM GmbH

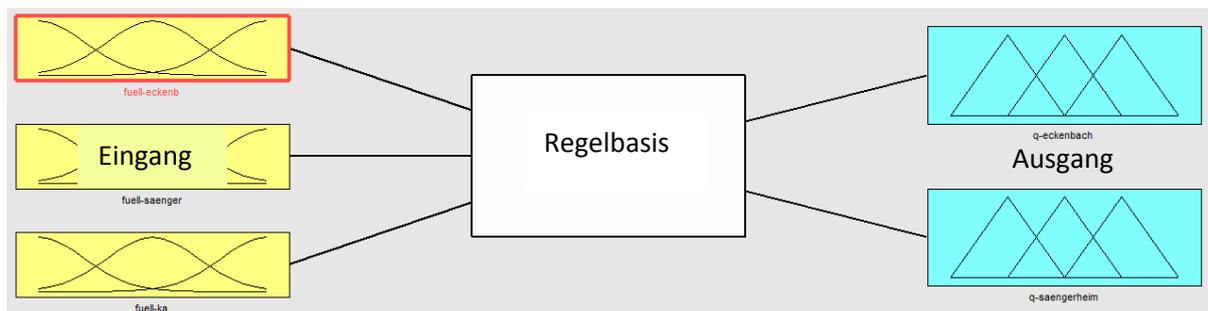
<sup>44</sup> Lineare Standard-Regler mit proportionalem, integralem oder differenzialem Verhalten

<sup>45</sup> Regelstrecke ist der Teil des Regelkreises, der durch den Regler beeinflusst werden soll

<sup>46</sup> Steuerungsmaßnahmen für den Kläranlagenbetrieb bei Mischwasserzufluss. Schriftreihe Siedlungswasserwirtschaft Nr. 43, Gesellschaft zur Förderung des Lehrstuhls für Siedlungswasserwirtschaft und Umwelttechnik an der Ruhr-Universität Bochum

In einem Fuzzy-Regler sind fünf Arbeitsschritte hinterlegt, die dazu dienen, für einen Eingangswert einen zugehörigen Ausgangswert zu bestimmen [SCHULZ 2002<sup>47</sup>]:

- Zugehörigkeitsfunktionen der Eingangsgrößen:  
Für die Eingangsgrößen (linguistische Variablen) werden Fuzzy-Mengen (linguistische Terme) festgelegt.
  - Linguistische Variablen = z.B. Temperatur, Füllstand, Niederschlag,...
  - Linguistische Terme = z.B. niedrig, mittel, hoch,...
- Fuzzifizierung:  
Für die scharfen Eingangsgrößen werden Zugehörigkeitsgrade zu einzelnen Fuzzy-Mengen – auch Fuzzy-Sets genannt – ermittelt.
- Regelbasis:  
Für die Verarbeitung der fuzzifizierten Eingangsgrößen wird ein Satz von WENN-DANN-Regeln aufgestellt.
- Fuzzy-logisches Schließen:  
Die Ermittlung einer Fuzzy-Menge der Ausgangsgröße nach einem Inferenzschema (in KANNST ist das die SUM-MIN Methode).
- Defuzzifizierung:  
Berechnung einer scharfen Ausgangsgröße, z.B. die Drosselwassermenge an einem RÜB.



**Abbildung 124: Schema eines Fuzzy-Reglers**

Die Regelbasis eines Fuzzy-Reglers stellt eine sehr gute Möglichkeit dar, Expertenwissen direkt in die Steuerungsstrategie einzubinden und anschließend auch umzusetzen [BOGENBERGER 2001<sup>48</sup>].

Fuzzy-Regler sind besonders gut geeignet mehrere Eingangsgrößen zu verarbeiten. Es ist daher möglich, einen Ausgangswert nicht nur von einer Eingangsgröße abhängig zu machen. Im KANNST Projekt sind diese Eingangsgrößen z.B. die Pegelstände von mehreren Becken.

<sup>47</sup> Regelungstechnik 2: Mehrgrößenregelung – Digitale Regelungstechnik – Fuzzy-Regelung. Oldenburg Verlag, München

<sup>48</sup> Adaptive Fuzzy Systems for Traffic Responsive and Coordinated Ramp Metering; Dissertation im Fachgebiet Verkehrstechnik und Verkehrsplanung, München

### 9.3 Aufbau der Fuzzy-Regelung im Kanalnetz Homburg-Bröl

Die Regler für das KANNST-Projekt werden immer für bestimmte Zustände des Zustandsgenerators optimiert. Dies hat vor allem den Vorteil, dass in den einzelnen Zuständen nicht jede Eingangsgröße relevant ist, womit die Regler einfacher und besser erstellbar werden. Das bedeutet z.B. für den vergleichmäßigen Regler im Zustand 4, dass es nicht notwendig ist, die Messgröße „Entlastungsmengen“ zu implementieren, da in diesem Zustand keine Entlastung stattfindet. Aus diesem Grund schaltet ein Zustandsgenerator immer den für den jeweiligen Zustand des Kanalnetzes ausgelegten Fuzzy-Regler aktiv. Mit diesem Konzept ist es möglich, sehr viel präziser als bei Verwendung nur eines allgemeingültigen Algorithmus zu regeln und zudem in jedem Zustand spezielle Ziele zu verfolgen (Vergleichmäßigung, Entlastungen vermeiden, etc.).

Prinzipiell gibt es im Projekt KANNST, für jeden Zustand zwei Fuzzy-Regler: Je einen für den Kanalstrang Nümbrecht und je einen für den Kanalstrang Waldbröl. Dabei können für den Kanalstrang Waldbröl und den Kanalstrang Nümbrecht verschiedene Zustände gelten, da z.B. ein Niederschlag, der den Kanalstrang Waldbröl belastet, nicht automatisch das Gebiet Nümbrecht betreffen muss.

Der regelnde Zugriff auf das Kanalnetz erfolgt immer über die Drosselmenge  $Q_d$  der einzelnen RÜB.

Abbildung 125 zeigt das Regelungskonzept für das Kanalnetz Homburg-Bröl. Dabei stellen die schwarzen Pfeile verarbeitende Signalströme dar, also den Austausch von Informationen (Füllständen, Entlastungsmengen, Drosselmengen etc.). Der „Fuzzy Waldbröl“ steht für die Fuzzy-Regler aus den einzelnen Zuständen aus dem Generator für den Strang Waldbröl. Ebenso verhält es sich mit dem „Fuzzy Nümbrecht“, der für die einzelnen Regler im Strang Nümbrecht steht.

Es gibt noch einen Regler der direkt auf der SPS umgesetzt wurde, der die optimale Verteilung der Wassermengen von den beiden Teilsträngen und einer Pumpstation „Elsenroth“ (die sich direkt an der KA befindet) übernimmt. Der Verteiler orientiert sich an der maximal zulässigen Zulaufmenge der KA.

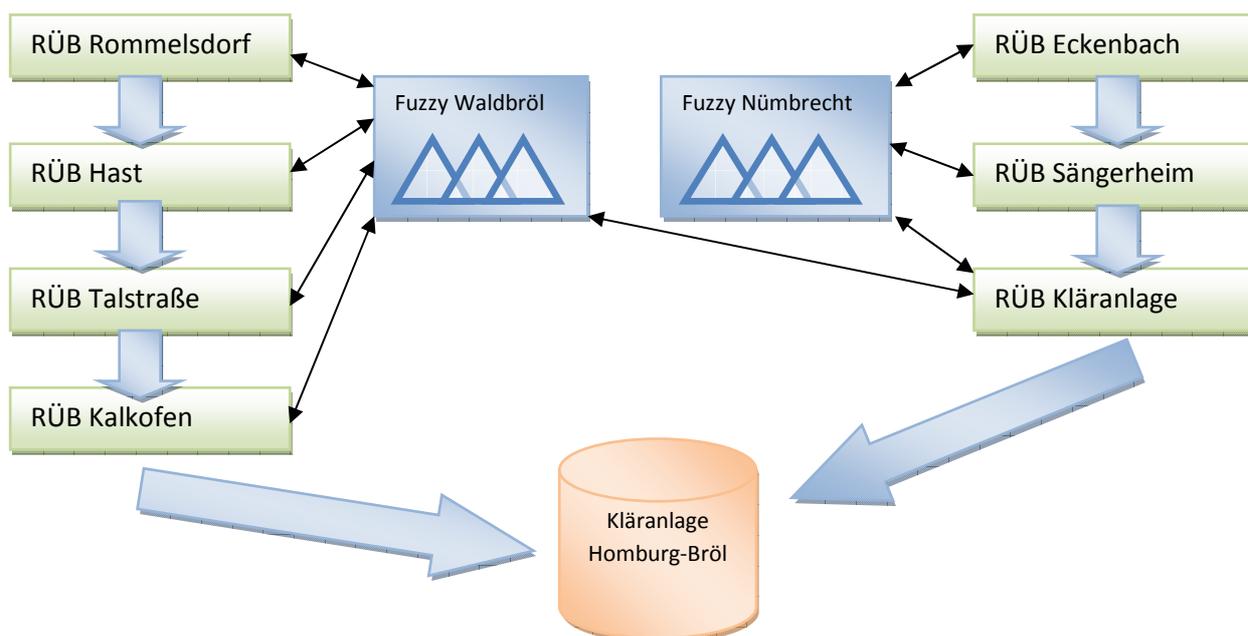


Abbildung 125: Prinzipieller Aufbau der KANNST Fuzzy-Regelung

Am Beispiel des Fuzzy-Reglers für den vierten Zustand wird hier exemplarisch die Funktion ausführlich dargestellt. In diesem Zustand füllen sich die einzelnen Becken und es soll ein möglichst gleichmäßiger Anstieg aller Becken erreicht werden.

Die Fuzzy-Regler für das KANNST Projekt wurden in der Software MATLAB (Matrix Laboratory) erstellt. Dies ist die gleiche Basis-Software, auf der auch die Simulationssoftware SIMBA® und SWMM® des Kanalnetzes sowie der KA mathematisch umgesetzt werden. So ist es möglich erstellte Fuzzy-Regler sofort an der Simulation des Netzes zu testen und zu optimieren, ohne dabei Schnittstellenprobleme zwischen den einzelnen Softwaresystemen lösen zu müssen, die bei anderen Untersuchungen erhebliche Probleme bereitet haben [ERBE 2004<sup>49</sup>].

### 9.3.1 Grunddaten des Reglers

Ziel des Reglers ist es, die hydraulischen Kapazitäten des Kanalnetzes und der RÜB optimal auszunutzen. Das heißt, es soll eine möglichst gleichmäßige Füllung aller Becken erfolgen.

Die wichtigsten Eingangsgrößen sind die Füllstände der RÜB und die Ausgangsgrößen sind die Drosselwassermengen an den RÜB.

#### Die Eingangs-Fuzzy-Sets und die Fuzzyfizierung

Für jeden Füllstand werden ein Satz von drei Fuzzy-Sets erstellt. Als linguistische Variablen werden *niedrig*, *mittel* und *hoch* gewählt. In Abbildung 126 sind beispielhaft die Fuzzy-Sets für den Füllstand im RÜB Eckenbach mit einem Füllstand von 0,3 (30%) eingezeichnet, was für das Fuzzy-Set *niedrig* einen Erfüllungsgrad von 0,8 und für das Fuzzy-Set *mittel* einen Erfüllungsgrad von 0,4 ergibt.

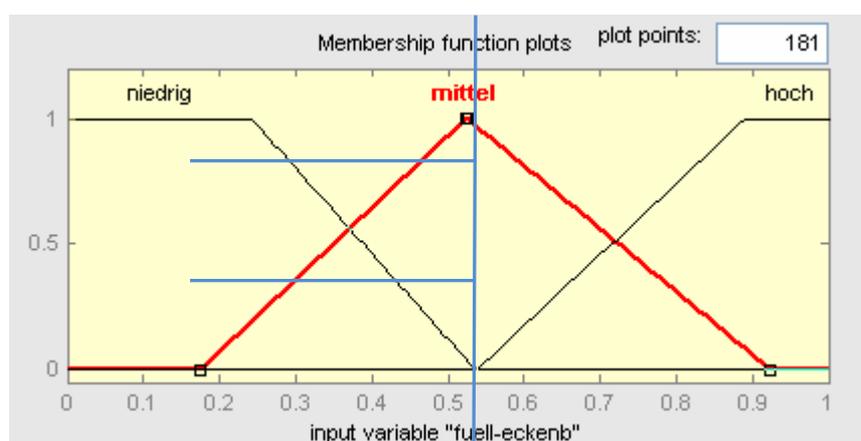


Abbildung 126: Eingangssets Füllstand RÜB Eckenbach

<sup>49</sup> Entwicklung eines integrierten Modellansatzes zur immissionsorientierten Bewirtschaftung von Kanalnetz, Kläranlage und Gewässer. Schriftreihe des Lehrstuhls Abfallwirtschaft und des Lehrstuhls Siedlungswasserwirtschaft Nr. 13, Bauhaus-Universität Weimar

### Die Regelbasis

Über die Regelbasis wird nun genau festgelegt, welches Eingangssset sich auf welches Ausgangsset auswirkt. Die Regelbasis beinhaltet also das gesamte Fachwissen, welches in den Regler eingeflossen ist. Sie beschreibt die generellen logischen Verhaltensweisen des Fuzzy-Reglers. Die Regelbasis für diesen Fuzzy-Regler Nümbrecht besteht aus 28 Regeln.

Diese Regeln sind jeweils in folgender Form in der Basis hinterlegt:

Wenn

Füllstand Eckenbach (niedrig / **mittel** / hoch)

und

Füllstand Sängenheim (**niedrig** / mittel / hoch)

und

Füllstand Kläranlage (niedrig / **mittel** / hoch)

Dann

Drosselmenge Eckenbach (sehr niedrig / niedrig / mittel / hoch / **sehr hoch**)

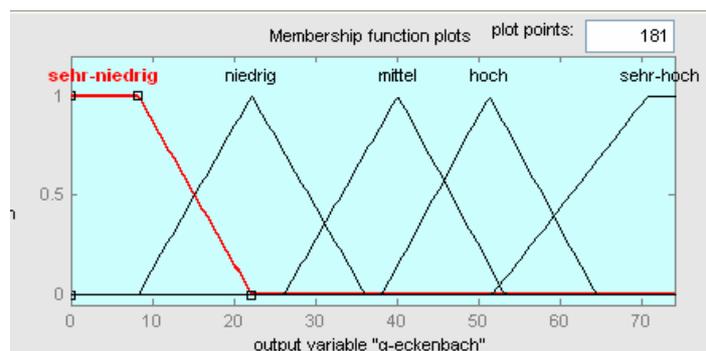
und

Drosselmenge Sängenheim (sehr niedrig / niedrig / **mittel** / hoch / sehr hoch)

An der Struktur ist zu erkennen, dass sich bei diesem Regler jede Regel auf zwei Ausgangssets bezieht. Es handelt sich dabei um zwei Regler, die mit den gleichen Eingangsssets arbeiten. Für eine noch präzisere Einstellung des Fuzzy-Reglers ist es möglich, jeder Regel eine Gewichtung zu geben. Dies wird im KANNST-Projekt mit Hilfe von genetischen Algorithmen durchgeführt. Dadurch ist es möglich, unkompliziert die unterschiedlichen Beckentypen und -größen in ihrem Füllungs- und Entleerungsverhalten zu berücksichtigen. Durch die Gewichtungen werden z.B. Becken mit großem Volumen bei der Füllung bevorzugt und kleinere RÜB geschont.

### Die Ausgangs-Fuzzy-Sets und die Defuzzifizierung

Für die Ausgangsgrößen werden jeweils fünf Fuzzy-Sets mit den linguistischen Variablen *sehr niedrig*,



*niedrig*, *mittel*, *hoch* und *sehr hoch* gewählt (Abbildung 127). Jede Regel aus der Regelbasis hat Einfluss auf die Ausgangs-Fuzzy-Sets und ergeben alle zusammen einen Ausgangswert, in diesem Fall eine Drosselwassermenge, als Vorgabe für den Schieber der Drossel am RÜB.

Abbildung 127: Ausgangssets Drosselmenge RÜB Eckenbach

### 3D-Darstellung von Fuzzy-Reglern

Eine gute Darstellungsweise für das Verhalten von Fuzzy-Reglern ist die 3D-Darstellung. In Abbildung 128 wird beispielhaft die Drosselmenge des RÜB Sangerheim, in Abhängigkeit des Füllstandes des RÜB Kläranlage und des RÜB Sangerheim, dargestellt. Die große rote Fläche lässt z.B. erkennen, dass die ersten 40 % (0,4) des Beckens KA keinen Einfluss auf die Drosselung des davor geschalteten Beckens Sangerheim haben. Erst danach wird das RÜB Sangerheim langsam, abhängig vom Füllstand des RÜB der Kläranlage, zunehmend gedrosselt. Die andere Eingangsgröße, der Füllstand des Beckens Sangerheim, verursacht eine Erhöhung der Drosselwassermenge, wenn das Becken gefüllt ist, denn der Regler ist so ausgelegt, dass ein gefülltes Becken baldmöglichst entleert wird.

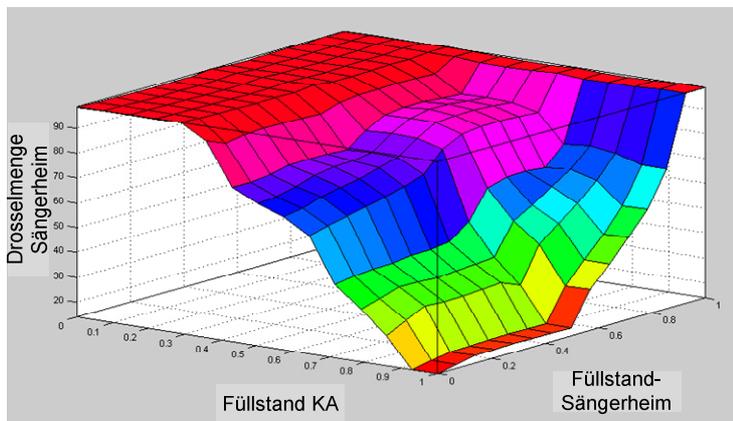


Abbildung 128: 3D Darstellung Fuzzy-Regler Zustand 4 Strang Nümbrecht

### 9.3.2 Fuzzy-Regler-Optimierung mittels Genetischer Algorithmen

Die gezielte Optimierung von Fuzzy-Reglern ist eine Herausforderung, da keine analytischen Einstellverfahren wie bei herkömmlichen Reglern existieren. Aus diesem Grund werden Fuzzy-Regler in erster Linie auf Basis von in der Praxis bewährten Erfahrungen ausgelegt und die verwendeten Regeln empirisch optimiert.

Intelligente Optimierungsverfahren aus dem Bereich der Computational Intelligence (CI), wie z.B. genetische Algorithmen, bieten hier die Möglichkeit (in MATLAB®) das Verhalten des Fuzzy-Reglers automatisch auf einen bestimmten Problemfall zu optimieren [SCHWEFEL ET AL. 2003<sup>50</sup>].

Da der Einsatz von CI-Methoden zu den wichtigen Komponenten dieser vorliegenden Arbeit gehört, wird an dieser Stelle die Verfahrensweise vorgestellt, die für die Anwendung im Rahmen der integrierten Kanalnetzregelung angewendet wird.

Im Fall des KANNST-Projekts wird der Fuzzy-Regler auf die Verminderung der Entlastungsmengen hin optimiert. Ziel ist es, alle Regenüberlaufbecken gleichmäßig einzustauen, um ein frühzeitiges Entlasten der Becken zu verhindern. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, müssen die aufgestellten Fuzzy-Regeln optimiert werden. Dies geschieht, indem für jede Regel eine Gewichtung bestimmt wird, mit der die Regel aktiv wird, was ein Maß für ihren Einfluss auf das Gesamtsystem darstellt. Bei dem vorliegenden Fuzzy-Regler handelt es sich für den Strang Nümbrecht um 28 Gewichtungen (28 Regeln) die verändert und angepasst werden, um eine optimale hydraulische Vergleichmäßigung im Kanalnetz zu erreichen.

<sup>50</sup> Advances in Computational Intelligence Theory and Practice, Springer Verlag

Voraussetzung für die Arbeit mit genetischen Algorithmen ist ein gewisses Grundverständnis der Funktionsweise, die in der folgenden Abbildung verdeutlicht wird.

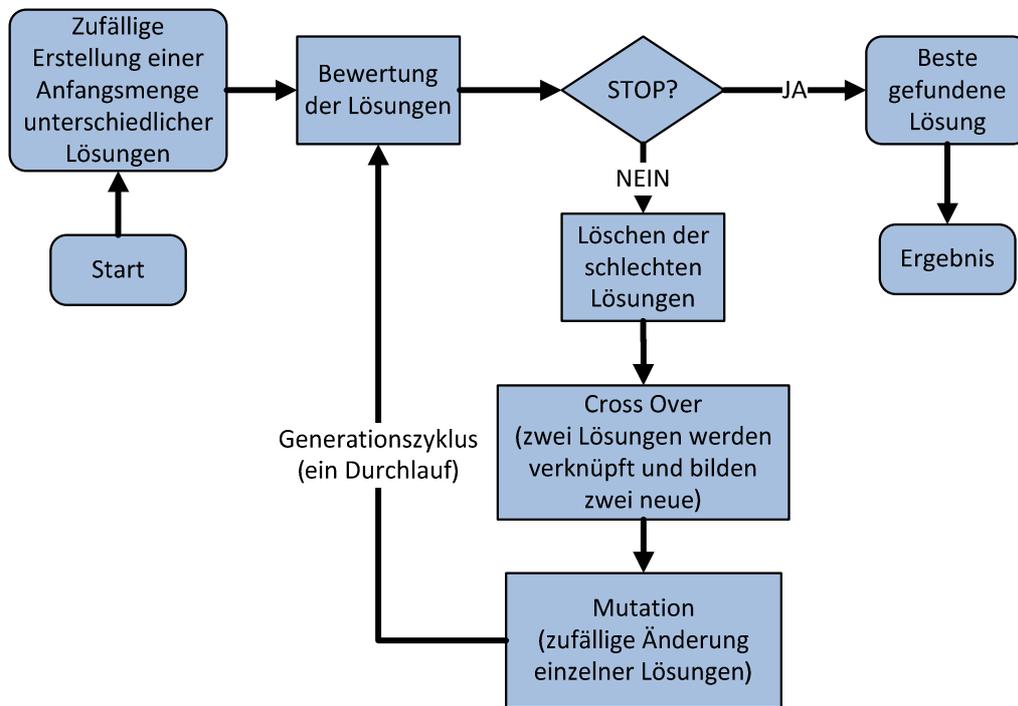


Abbildung 129: Funktionsweise eines genetischen Algorithmus [VGL. MITCHEL 1995<sup>51</sup>]

Der erste Schritt besteht darin, zufällige Gewichtungen für die 28 Regeln zu erzeugen, die als Startzustand dienen. Hierbei werden mehrere Datensätze automatisch per Zufallsgenerator erzeugt, die zusammen als Start-Population bezeichnet werden. In der Umsetzung für den KANNST-Regler werden am Anfang 30 Lösungen generiert und in der Start-Population zusammengefasst. Jede dieser Lösungen beinhaltet 28 unterschiedliche Gewichtungen. Diese Startmenge an Lösungen muss im Folgenden bewertet werden, um eine Aussage über die Güte der Lösungen machen zu können. Mit der Art der Bewertung der Lösungen kann das Ergebnis des genetischen Algorithmus stark beeinflusst werden. Die Funktion zur Bewertung der Lösungen sollte sorgfältig ausgewählt werden.

Für die Bewertung der generierten Lösungen für den Fuzzy-Regler werden die freien Kapazitäten der Regenüberlaufbecken herangezogen. Zum Zeitpunkt, in dem das erste Becken abschlägt, dürfen die anderen Becken nur über wenig freies Volumen verfügen. In diesem Fall hat der Regler optimal vergleichmäßig. Gibt es in den benachbarten Becken große freie Kapazitäten, so wäre der Fuzzy-Regler besonders schlecht. Die folgende Bewertungsformel wurde im genetischen Algorithmus verwendet [MITCHELL 1995].

$$\text{Bewertung} = \sum_{i=1}^3 [V_{\text{Gesamt-Becken}_i} - V_{\text{genutzt-Becken}_i}]^2$$

Formel 3: Bewertungsformel für Genetischen Algorithmus

<sup>51</sup> An Introduction to Genetic Algorithms, MIT Press, Cambridge

Von jedem einzelnen Becken – in diesem Fall Strang Nümbrecht (3 RÜB) – wird über die in der Formel angegebene Differenz das noch freie Restvolumen (in m<sup>3</sup>) berechnet, quadriert und addiert. Sind im Moment der Entlastung alle Becken gleichzeitig voll, so ist der Wert dieser Funktion Null und die Bewertung somit am besten. Die Restvolumina werden quadriert um zu garantieren, dass Becken, die relativ wenig gefüllt sind, stärker ins Gewicht fallen als Becken, die nahezu voll sind.

Auf Basis dieser Formel werden alle generierten Lösungen der Start-Population bewertet und klassifiziert. Die Lösungen mit einer schlechten Bewertung werden verworfen und die mit einer guten Bewertung bleiben erhalten.

Die für die Parameteroptimierung benötigten Daten der Füllstände in den Regenüberlaufbecken werden aus der Kanalnetzsimulation entnommen. Jede Lösung wird mit ihren unterschiedlichen Gewichtungen in den Fuzzy-Regler und in das Simulationsmodell des Kanalnetzes übernommen, wo die Füllstände zum Zeitpunkt der Entlastung des ersten Beckens gespeichert werden. Diese Ergebnisse bilden dann die Basis für die Bewertungsfunktion des genetischen Algorithmus.

Nach den Simulationsläufen werden gute Lösungen ausgewählt und miteinander verknüpft, sodass zwei neue Lösungsmengen entstehen. Dieses Verfahren nennt man „Cross Over“. Bei 30 Lösungen in der Startpopulation werden nach der ersten Bewertung die 15 schlechtesten Lösungen verworfen und die anderen 15 so mit neuen generierten Parametersätzen verbunden, dass man in der Summe wieder 30 Lösungen bekommt, mit denen die Auswertungen erneut beginnen.

Die Verknüpfung zweier Lösungen zu zwei neuen Parametersätzen geschieht folgendermaßen:

$$L_{neu1} = L_1 + rand * (L_2 - L_1)$$

**Formel 4: Parametersatzbildung 1**

$$L_{neu2} = L_2 + rand * (L_2 - L_1)$$

**Formel 5: Parametersatzbildung 2**

Hinter der Bezeichnung „rand“ verbirgt sich eine Zufallszahl zwischen 0 und 1, die angibt wie stark die Veränderung der ursprünglichen Lösung ausfällt.

Abschließend werden einzelne der neu erstellten 30 Lösungen per Zufall leicht verändert. Diesen Vorgang bezeichnet man als „Mutation“.

Aufgrund der Tatsache, dass nicht eindeutig bestimmt werden kann, wo die optimale Lösung zu finden ist, besteht die Möglichkeit einer besseren Lösung, die der Algorithmus noch nicht gefunden hat. Deshalb ist die Mutation ein wichtiger Faktor, da diese Manipulation der Lösungen das Verlassen eines sekundären Minimums ermöglicht, um an einer anderen Stelle nach besseren Lösungen zu suchen.

Mit Abschluss der Mutation liegen nun wieder 30 neue Lösungen vor, von denen jede 28 unterschiedliche Gewichtungen der Fuzzy-Regeln enthält. Diese Lösungen werden nun wieder bewertet und über die Verfahren Cross Over und Mutation verändert, worauf der Prozess wieder von neuem beginnt.

Einen solchen Durchlauf eines genetischen Algorithmus bezeichnet man als Generation. Die Anzahl an Generationen, die der Algorithmus durchläuft, wird im Allgemeinen zu Beginn auf 100 festgelegt [vgl. Mitchell 1995].

Abbildung 130 zeigt deutlich, dass der genetische Algorithmus eine ständige Verbesserung des Fuzzy-Reglers bis etwa zur Generation 40 erreicht. Danach wird keine weitere Verbesserung erzielt, da eine sehr gute Gewichtung für den Fuzzy-Regler bereits gefunden worden ist. Die blaue und die schwarze Linie verkörpern jeweils das schlechteste und das beste Individuum einer Generation.

Genetische Algorithmen bzw. Mutationen, die eine Art treibende Kraft für die Entwicklung des Lebens auf diesem Planeten sind, zeigen auch hier ihre einzigartige Fähigkeit, Optimierungspotenziale in komplexen Systemen erfolgreich zu nutzen.

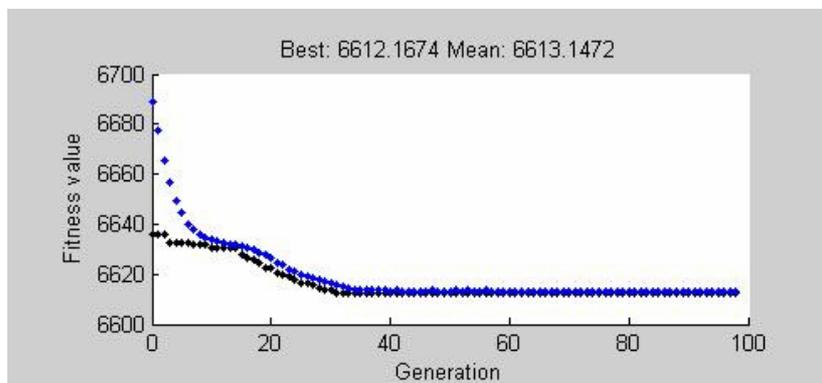


Abbildung 130: Verbesserung der Bewertung des Fuzzy-Reglers während der Optimierung

### 9.3.3 Funktion des Fuzzy-Reglers im Zustand 5 und 7

Die oben beschriebene Funktion für den Zustand 4 und die Optimierung mittels CI-Methoden sind auch die Basis für den Fuzzy-Regler in Zustand 5 und 7.

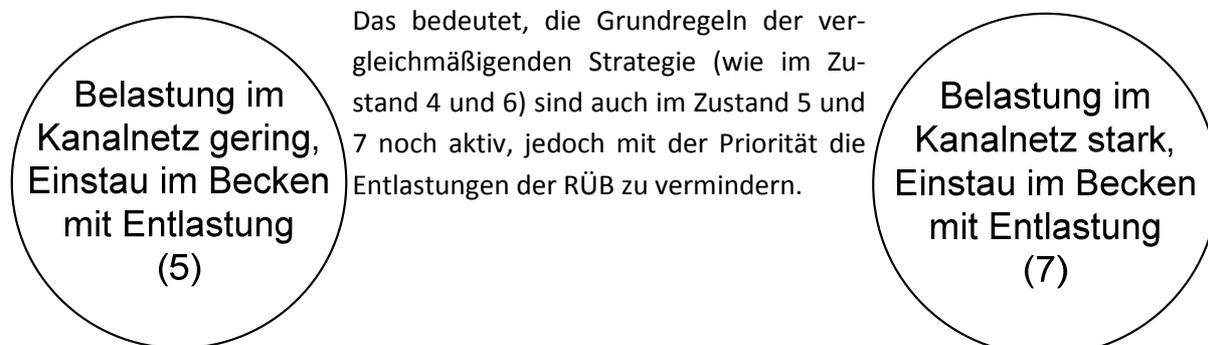
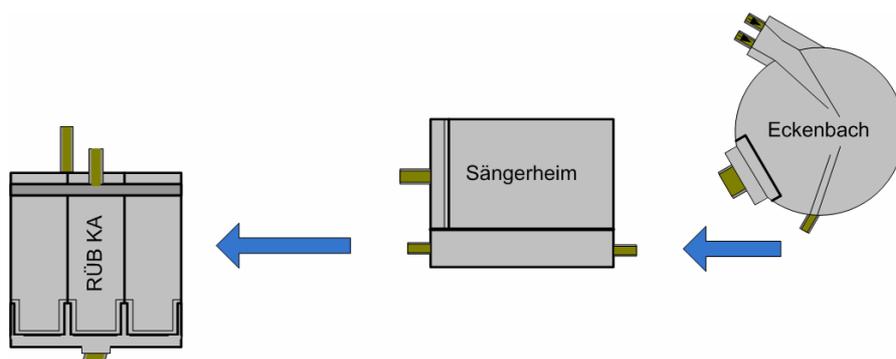


Abbildung 131: Zustände 5 und 7

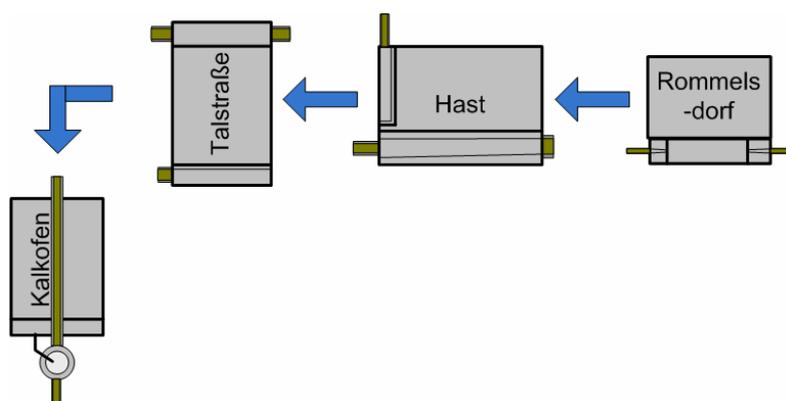
Im Strang Nümbrecht bilden die Becken RÜB KA, RÜB Sägerheim und RÜB Eckenbach für den Regler eine Einheit (Abbildung 132). Beginnt eines der drei Becken zu entlasten, wird der Zustand 5 bzw. 7 aktiv, abhängig von der Belastung des Kanalnetzes. In Fließrichtung vom RÜB Eckenbach bis zum RÜB KA wird jeweils das RÜB, welches vor dem entlastenden Becken liegt, auf bis zu 5 l/s gedrosselt. Sobald dieses gedrosselte Becken auch entlastet, wird die Regel aufgehoben und ein vergleichmäßiger Regler ist wieder aktiv, der die Entlastungssumme über alle Becken minimiert.



**Abbildung 132: Becken im Strang Nümbrecht**

Das bedeutet z.B.: Wenn RÜB KA und RÜB Sängnerheim entlasten und das RÜB Eckenbach noch freies Volumen im Becken aufweist, dann wird zum Schutz der beiden ersten Becken das RÜB Eckenbach gedrosselt, so dass die Drosselmenge auf bis zu 5 l/s herunter gefahren wird. Die anderen Becken werden nach den Verfahren der gleichmäßigen Verteilung von Zustand 4 und 6 weiter geregelt.

Im Strang Nümbrecht bilden die Becken RÜB Kalkofen, Talstraße, Hast und Rommelsdorf eine Einheit (Abbildung 133). Zum Zeitpunkt, in dem eines dieser vier Becken zu entlasten beginnt, wird der Zustand 5 bzw. 7 aktiv, je nach Belastung des Kanalnetzes. Der Regler im Zustand 5 und 7 ist von der Verfahrensweise identisch mit dem Regler für den Strang Nümbrecht.



**Abbildung 133: Becken im Strang Waldbröl**

Wenn alle Becken im Strang Nümbrecht oder Waldbröl entlasten, ist der Zustand 8 erreicht. Damit greift der Regler nicht mehr aktiv ein und die lokale Steuerung stellt die im Plan 2012 statisch vorgegebenen Drosselmengen ein.

## 9.4 Auswertungs- und Kontrollmöglichkeiten mit dem SWMM® Monitor

Das Regelungskonzept wird direkt in das Modell des Kanalnetzes eingebunden und kann in dieser Umgebung getestet werden. Für die neuen erhöhten Drosselmengen bei Einsatz des Reglers muss die Auswirkung auf das Gesamtsystem überprüft werden. Dafür bietet die Simulationsumgebung SIMBA® mehrere Möglichkeiten für die Validierung der simulierten Werte mit den PDV-Messdaten.

Im Anschluss an einen Simulationslauf kann die hydraulische Belastung des Kanalnetzes über den Zeitraum der Simulation mit dem SWMM®-Monitor abgebildet werden. Dies ermöglicht eine genaue Untersuchung und Auswertung des Systems. Für die Auswertungen werden die Szenarien 4 bis 9 verwendet.

### 9.4.1 Untersuchungen zur Auslastung des Kanalnetzes unter Einsatz des Reglers

Ziel der Auslastungs-Untersuchungen ist es, anhand der Simulation abzuklären, ob beim Einsatz der Kanalnetzregelung mit zusätzlichen Überlastungen des Kanalnetzes zu rechnen ist und ob die Belastungen problematisch sind. In diesem Fall müssten die neu definierten Drosselwassermengen geändert werden.

Die Tests werden überwiegend mit den Szenarien 5 (25.02.2007 bis 11.03.2007) und 6 (21.06.2007 bis 28.06.2007) durchgeführt. Das Szenario 5 liegt laut KOSTRA-Tabelle weit unter einem halbjährlichen Ereignis, während Szenario 6 zwischen einem ein- und zweijährlichen einzuordnen ist. Diese beiden Szenarien werden für die ersten Tests ausgewählt, da so der Fall eines starken und eines weniger starken Regenereignisses abgedeckt wird.

Die Szenarien werden unter Einsatz der Regelung über den gesamten Zeitraum simuliert. Die weiteren Untersuchungen werden dann in mehreren Stufen durchgeführt (Abbildung 134).

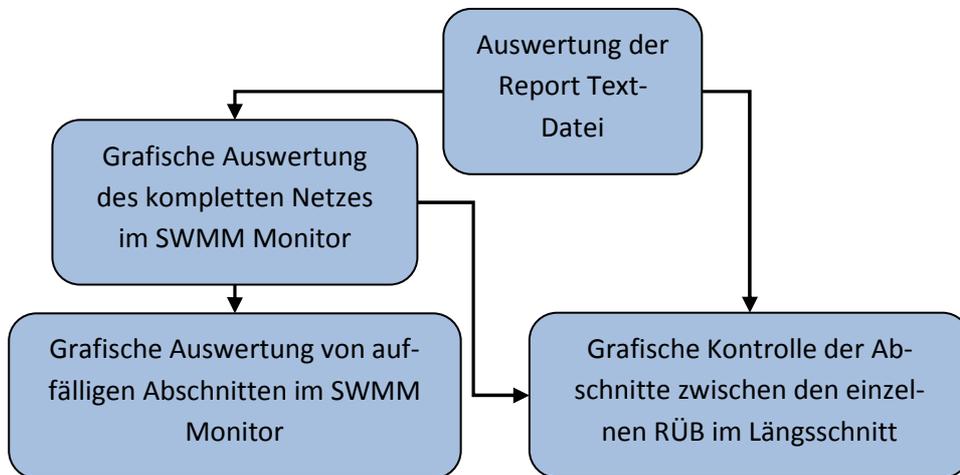


Abbildung 134: Ablauf der Auswertung von Simulationsergebnissen

In einem ersten Schritt wird die Reportdatei, die während der Simulation aufgezeichnet wird, ausgewertet (Abbildung 135 und Abbildung 136).

Node	Type	Inflow	Occurrence	Overflow	Flooding	Time of Max	Total
00410075	JUNCTION	0,00	0,98	0	19:11	0,00	0,00

Abbildung 135: Ausschnitt aus der Report-Datei Teil 1

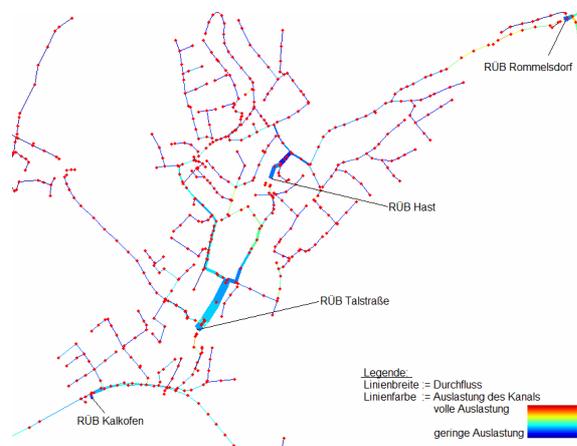
Node	Type	Meters	Meters	Meters	days hr:min	ha:mm	Flooded
00410080	JUNCTION	0,01	0,01	245,95	6	19:23	0

Abbildung 136: Ausschnitt aus der Report-Datei Teil 2

Die Auswertung der gesamten Report-Datei, die alle Haltungen und Schächte auflistet, ergibt weder in Szenario 5 noch in Szenario 6 überstaute Schächte zwischen den einzelnen geregelten RÜB. In der Spalte „Maximum Flooding Overflow“ (orange Umrandung in Abbildung 135) kann abgelesen werden, ob während der Simulation ein Anstieg des Wasserstandes in einzelnen Schächten auftritt. In der Spalte „Total Minutes Flooded“ (orange Umrandung in Abbildung 136) lässt sich feststellen, ob es während der Simulationsdauer zum Überstau eines Schachtes kommt.

Die Auswertung der Report-Datei ergibt in Szenario 5 in keinem Schacht zwischen den RÜB einen Anstieg des Wasserstandes. In Szenario 6 gab es einen leichten Anstieg in einem Schacht direkt hinter dem RÜB Talstraße, der aber keine Gefahr darstellt, da eine noch höhere hydraulische Belastung an dieser Stelle nicht zu erwarten ist und der Schacht noch genügend freies Volumen aufweist.

Die Kanalabschnitte zwischen den einzelnen RÜB, die für die Regelung relevant sind, können durch eine gezielte Kontrolle eines vergrößerten Ausschnitts im SWMM® Monitor überprüft werden (Abbildung 137).

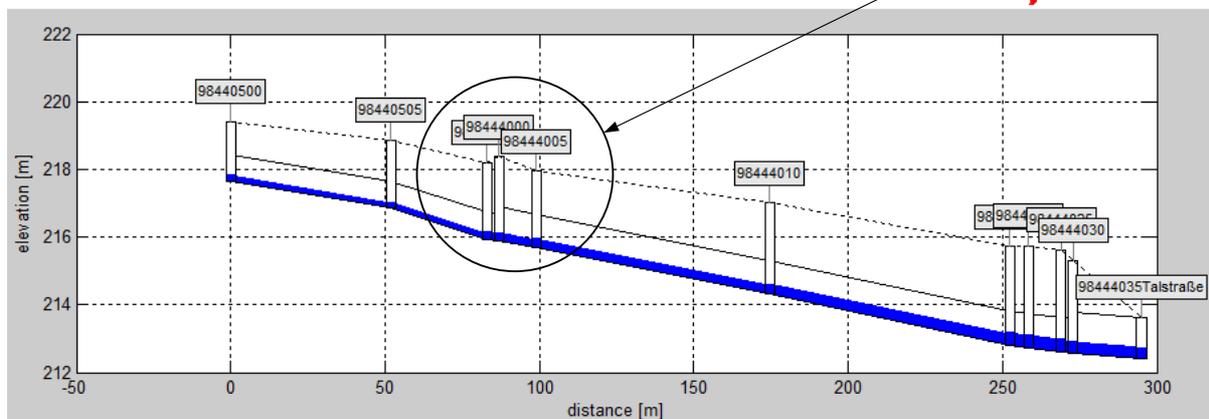


**Abbildung 137: Ausschnitt der Kanalnetzauslastung im Lageplan, hier Strang Waldbröl**

Für weitergehende Untersuchungen werden grafische Auswertungen im Längsschnitt für auffällige Abschnitte genutzt. Diese ermöglichen eine exakte Abbildung der Wassermengen in einem ausgesuchten Kanal-Längsschnitt. Die folgenden beiden Grafiken zeigen diese Art der Darstellung in einem Kanallängsschnitt oberhalb und unterhalb des RÜB Talstraße.

Darstellung des Abschnittes oberhalb RÜB Talstraße im Längsschnitt

25-Jun-2007 01:39:00

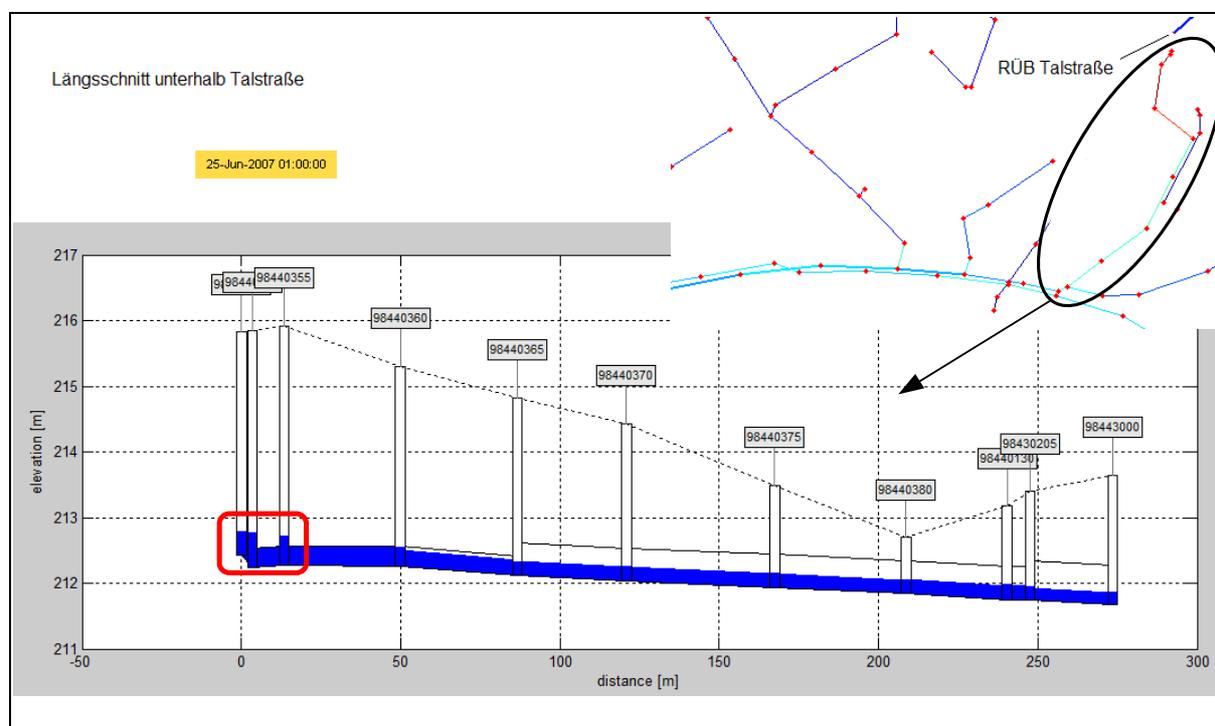


**Abbildung 138: Kanal im Längsschnitt**

Deutlich ist der Wasserstand (blau) zu erkennen. Der Lageplan zeigte bereits einen hohen Durchfluss bei geringer Auslastung des Kanals.

Die Report-Datei enthält z.B. in Szenario 6 einen leichten Anstieg in den Schächten direkt unterhalb RÜB Talstraße, was im Längsschnitt in Abbildung 139 in den ersten drei Schächten hinter dem Becken (bis Schacht 98440355) zu erkennen ist.

Für diese Abbildung wird bewusst ein Ausschnitt gewählt (25. Juni 2007, kurz nach 00:00 Uhr), in dem die Regelung aktiv ist und noch nicht alle Becken entlasten (Zustand 8 = Ausstieg der Regelung). Der leichte Anstieg in den Schächten direkt hinter dem RÜB Talstraße stellt die maximal mögliche Belastung mit der neuen Drosselmengen von 70 l/s an diesem Abschnitt dar.



**Abbildung 139: Längsschnitt unterhalb RÜB Talstraße mit Markierung des Wasseranstiegs in den ersten drei Schächten**

Für die Prüfung des Regelungssystems werden alle Werkzeuge, die in der Simulationssoftware zur Verfügung stehen, genutzt, um die Belastung des Kanalnetzes zu überprüfen.

Die neu festgelegten Drosselmengen aus Tabelle 12 halten auch in Tests mit extremen Regenereignissen stand und sind für die Genehmigung des hydraulischen Regelungskonzepts von der BZR Köln zugelassen worden.

Das Gesamtkonzept benötigt für die Umsetzung ins kommunale Kanalnetz Homburg-Bröl nicht nur geprüfte Drosselmengen, sondern in der Zukunft auch Ergebnisse sowie empirische Nachweise, die den Nutzen und die Effektivität der Kanalnetzregelung beweisen und für den praktischen Einsatz in ein betriebliches Sicherheitskonzept einfließen.

Während der gesamten Betriebszeit ist es in der Realität zu keiner Überlastung des Netzes gekommen.

## 10 Datenübertragung, -Dichte, -Auswertung, -Aufzeichnung

### 10.1 Systemaufbau der Datenübertragung

Der Ansatz des KANNST-Projekts und dessen Umsetzung in die Praxis erfordern einen sehr hohen Aufwand, die bestehenden Strukturen an den ausgewählten Betriebspunkten zu erfassen und zu bewerten.

Neben den ausgewählten RÜB gehören dazu auch die entsprechenden Anlagenschnittstellen, die vorhandenen Datenwege und Übertragungsmöglichkeiten, die Kapazitäten vorhandener Einrichtungen wie SPS oder auch einfach nur der zur Verfügung stehende Platz in den vorhandenen Schaltschränken um weitere Einbauten unterbringen zu können.

So wird ausgehend von dem örtlichen Betrieb „RÜB“ die Gesamtstruktur der benötigten und beteiligten Komponenten aufgenommen und analysiert:

- RÜB, erweitert um fehlende Einrichtungen und den im KANNST Projekt benötigten Messcontainer
- Anbindung an Datenübertragungswege (Nutzung vorhandener Strukturen, Aufbau neuer Anbindungen)
- Installation, Konfiguration des Regler PCs und dessen Anbindung an das System
- Installation, Konfiguration eines Daten PCs (Datensicherung vor Ort)
- Einbindung einer Visualisierungssoftware
- Einbindung des PLS zur Beurteilung lfd. Prozesse
- Entwicklung von Transfer-Tabellen soweit benötigt
- Konformität der Schnittstellen herstellen
- Sicherheitsabschaltungen implementieren

Der nachfolgenden Übersicht ist zu entnehmen, wie die sechs unterschiedlich ausgestatteten Stellen zueinander angeordnet sind und auf welchen Wegen die Kommunikation abgewickelt wird. Aus Sicherheitsgründen zusätzlich betriebene Funkstrecken sind hier nicht aufgeführt.

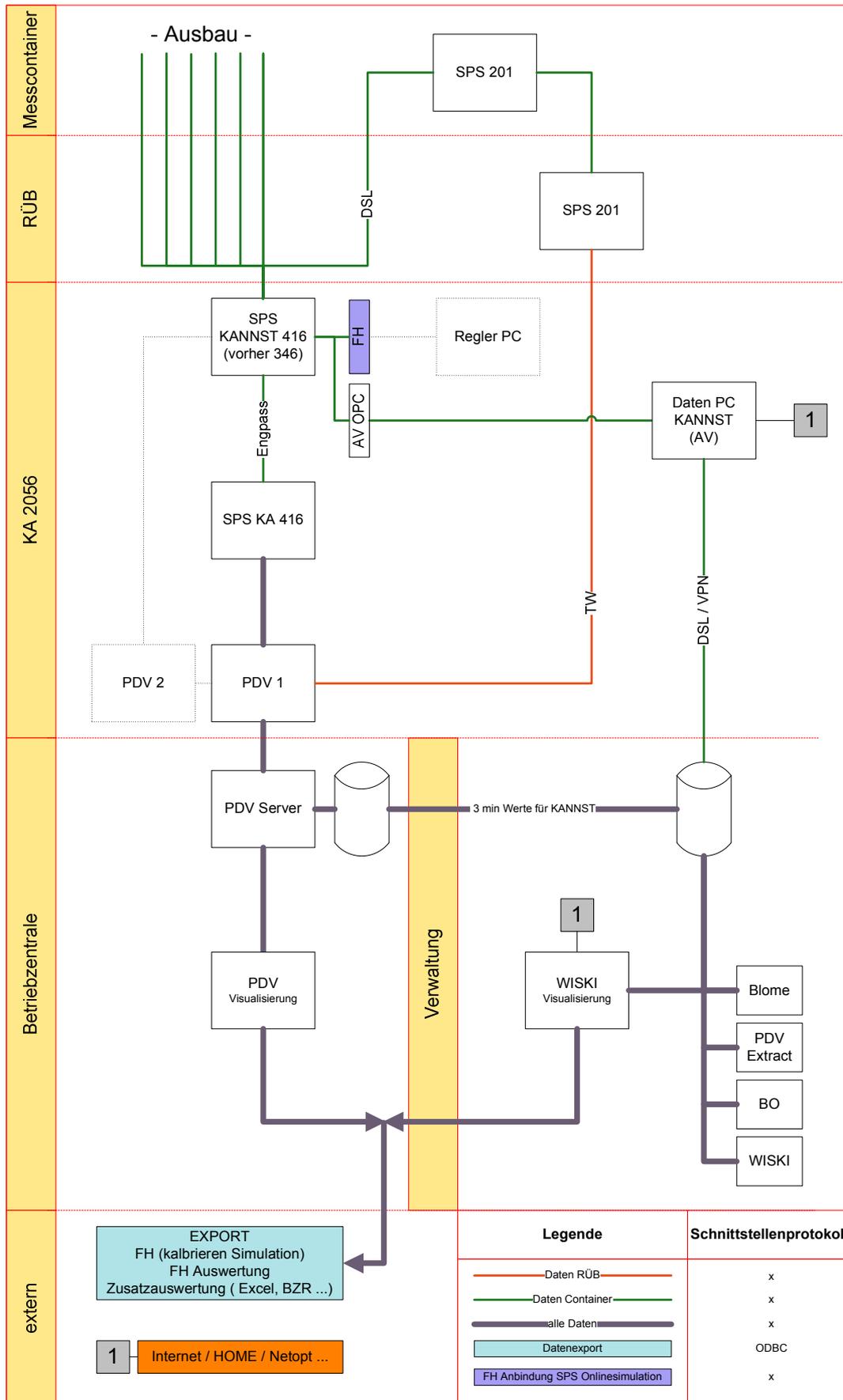


Abbildung 140: Datenwege

## 10.2 Standleitung, ISDN-Anwahl, GSM/GPRS/UMTS, DSL

Bei einer Kanalnetzsteuerung sind verlässliche Datenkommunikationswege zur Übertragung von Messwerten, Status-Meldungen und Stellgrößen von essentieller Bedeutung. Längere Unterbrechungen der Datenübertragung an entscheidenden Punkten können im ungünstigsten Fall zum Ausstieg der gesamten Regelung führen. Sobald die Regelung aufgrund einer solchen Unterbrechung außer Betrieb gesetzt wird, arbeiten die betroffenen RÜB-Steuerungen mit den vor Ort hinterlegten statischen Drosselwassermengen. Diese entsprechen dem des unregulierten Kanalnetzes, nach dem Netzplan für die Prognose 2012.

Im Rahmen des Projektes werden verschiedene Arten der Datenübertragung von den Regenüberlaufbecken bzw. Messcontainern zur KANNST-SPS auf dem Gelände der Kläranlage Homburg-Bröl verwendet. Zunächst wird mit bereits vorhandenen Übertragungstechniken gearbeitet, die dann im Projektverlauf aufgrund von technischen Änderungen gewechselt wird. Letztendlich kann die Übertragung mit Hilfe von zunehmend günstiger werdenden Breitbandverbindungen schneller und zuverlässiger gestaltet werden.

Die folgende Abbildung zeigt die sternförmige Struktur der Datenübertragungswege im KANNST-Projekt, wie sie im Prozessleitsystem des Aggerverbands wiedergegeben werden. Hier werden einwandfrei arbeitende Verbindungen durch grüne Linien repräsentiert, die im Störfall rot aufblincken.

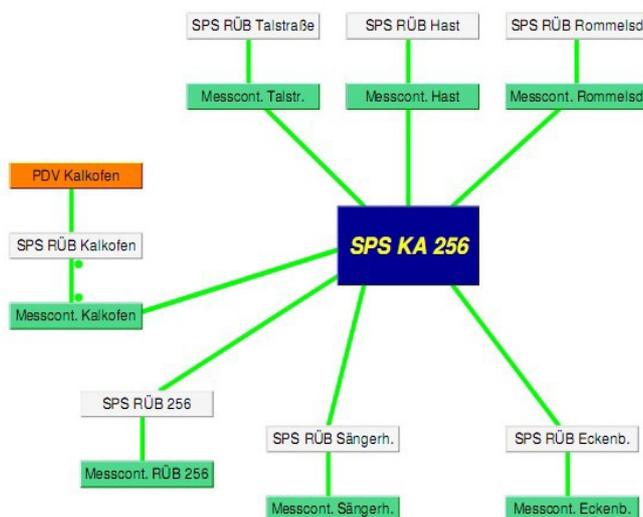


Abbildung 141: Sternförmige Verbindungsstruktur

Während des Projektes kommen in zeitlicher Abfolge unterschiedliche Datenübertragungstechniken zum Einsatz:

- Standleitungen mit analogen Modems (seit Projektbeginn 2005 bis 15.09.2009)
- ISDN-Anwahl-Verbindung (vom 15.09.2009 bis Juli 2010)
- DSL (Juli 2010; z.B. RÜB Hast seit 13.07.2010)

- UMTS/GPRS (RÜB Talstraße seit 23.09.2010)

Im Anschluss werden die Besonderheiten der verschiedenen Verbindungstypen kurz erläutert und die damit verbundenen Erfahrungen geschildert. Abschließend folgt ein bewertender Vergleich der Datenübertragungstechniken mit Fokussierung auf deren Verfügbarkeit und Kosten.

### 10.2.1 Analoge Standleitungen

Als die Regelung im Juni 2008 in Betrieb geht, existiert eine dauerhafte Verbindung zwischen der zentral gelegenen KANNST-SPS (Speicherprogrammierbare Steuerung) in der Kläranlagen-Warte „Homburg-Bröl“ und den RÜB-Steuerungen an den Betriebsorten. Die SPS ist über eine Fernwirkbaugruppe, mit angeschlossenem analogem Modem, an die RÜB-Steuerungen gekoppelt. Über Standleitungen kann die Zentrale praktisch gleichzeitig Daten mit den verschiedenen Teilnehmern austauschen. Dazu muss in jedem Messcontainer bzw. Betriebsgebäude ein analoges „Party-line-Modem“ (Modem für Standleitung) vorhanden sein, wie es auf der Abbildung rechts zu sehen ist. Die im Mittelpunkt stehende SPS in Homburg-Bröl ist mit dem Regler-PC verbunden und erhält von diesem beispielsweise Sollwerte für Drosselwassermengen, die dann in Richtung der Stellorgane vor Ort weitergegeben werden.



Abbildung 142:  
Analog- Modem

Das geschilderte Verfahren funktioniert gut. Trotzdem kommt es vereinzelt immer wieder mal zu Kopplungsstörungen. Die Modems reagieren mitunter ohne erkennbaren Grund plötzlich nicht mehr. Bei Gewittern mit Blitzschlag tritt dieses Problem verstärkt auf. Um eine solche Störung zu beheben, muss jeweils ein Mitarbeiter das Gerät kurzzeitig vom Netz nehmen, um es anschließend wieder in Betrieb nehmen zu können. Nur so lässt sich die Störung beseitigen und quittieren. Ein „aufgehängtes“ Modem führt nicht nur zu einem statisch ungeregelten Betrieb, sondern es werden auch keine aktuellen Messwerte von den RÜB übertragen.

In der PDV sind Kopplungsstörungen an fortlaufend konstanten Messwerten zu erkennen. Je nach Typ der PDV-Unterstation werden Messwerte bei einer Kopplungsstörung vor Ort für begrenzte Zeit zwischengespeichert und bei reaktiver Verbindung im Nachhinein in die Datenbank übertragen. Fällt beispielsweise die Verbindung während eines Entlastungsereignisses aus, wird der letzte übertragene Wert fortlaufend weiter in die Datenbank geschrieben und ein eventuelles Ende der Entlastung nicht bemerkt. Ohne Datenplausibilisierung und Korrektur kann es zu fehlerhaften PDV-Monats- und Jahresprotokollen kommen. Im konkreten Beispiel würden zu große Entlastungswassermengen errechnet.

### 10.2.2 ISDN mit Anwahl durch Modem

Die Deutsche Telekom hat alle laufenden Verträge zum Produkt „analoge Standard-Festverbindungen“ zum 30.09.2009 gekündigt. Hätte weiterhin mit Standleitungen gearbeitet werden sollen, wäre ein Umstieg auf ISDN-Festverbindungen „Primär Multiplex“ (PMx) notwendig gewesen. Dieser Service der deutschen Telekom für Geschäftskunden ist zu diesem Zeitpunkt mit monatlichen Kosten von 399 EUR pro Anschluss unverhältnismäßig kostenintensiv.

Um preiswerten Ersatz zu schaffen und einen nahtlosen Weiterbetrieb zu sichern, wird seitens der Abteilung Automatisierungstechnik kurzfristig eine Ausweichlösung umgesetzt. Im Gegensatz zu den bewährten Festverbindungen funktioniert diese Form der Datenübertragung mit Wählverbindungen: Die zentrale SPS mit Fernwirkbaugruppe und ISDN-Wähl-Modem ruft ein RÜB nach dem anderen an. Zu diesem Zeitpunkt kann immer nur eine Verbindung aktiv zum Datenaustausch genutzt werden. Zur Optimierung werden zwei Modems an die KANNST-SPS angeschlossen, wobei jedes Gerät zyklisch nacheinander alle RÜB in einem Strang des Kanalnetzes anruft:

Modem 1 KA: RÜB Eckenbach, Sängersheim (Strang Nümbrecht)

Modem 2 KA: RÜB Rommelsdorf, Hast, Talstraße, Kalkofen (Strang Waldbröl)

Das RÜB auf der Kläranlage ist direkt mit dem Leitsystem verbunden.

Es stellt sich heraus, dass die Anwahl mit ISDN-Modem nur eine Übergangslösung sein kann. Die auftretende Anzahl der Verbindungsabbrüche mit den bereits beschriebenen Konsequenzen ist inakzeptabel hoch. Um das Problem zu verdeutlichen folgt ein Auszug aus einem Störungsüberwachungsprotokoll. Anstehende Störungen werden bei Kontrollgängen abgelesen und handschriftlich in Protokolle eingetragen.

**Tabelle 14: Störungsüberwachungsprotokoll RÜB Talstraße**

Datum	Uhrzeit	Bemerkung
05.07.10	14.00	Busausfall Homburg-Bröl
08.07.10	13.50	Busausfall Homburg-Bröl
13.07.10	13.30	Busausfall Homburg-Bröl
19.07.10	10.00	Busausfall Homburg-Bröl
23.07.10	09.20	Busausfall Homburg-Bröl
27.07.10	10.15	Busausfall Homburg-Bröl

Die Situation kann selbst durch mehrfache Programmmodifikationen und Softwareupdates nicht wesentlich verbessert werden. Letztendlich werden mangelhafte Modem-Treiberbausteine des Herstellers für die aufgetretenen Fehler verantwortlich gemacht. Diese vorgefertigten Bausteine sind für den Benutzer nicht ohne Weiteres zu ändern.

### 10.2.3 DSL-Verbindungen

Um stabile und schnelle Verbindungsverhältnisse zu gewährleisten, werden fast alle Steuerungen etwa Mitte 2010 auf DSL-Technik umgerüstet. Im Unterschied zu den ursprünglichen Verbindungsarten werden die SPS hier über geeignete Umsetz-Module per Ethernet angeschlossen und nicht wie zuvor mittels serieller Schnittstelle RS232. Die ordnungsgemäße Funktion der DSL-Verbindungen lässt sich nun von der EDV-Abteilung des Aggerverbands aus (Verwaltung Sonnenstraße) überwachen. Eventuelle Ausfälle können anhand von Protokollen zeitlich eingeordnet und belegt werden. Eine Auswertung dieser Protokolle zeigt eine hohe Verfügbarkeit der DSL-Verbindungen. Seitdem die DSL-Verbindungen in Betrieb sind, ist es nur zu einem nennenswerten längeren Ausfall gekommen: Vom 01.07.2011 bis zum 18.07.2011 waren die DSL Verbindung „RÜB Kalkofen“ unterbrochen. Da eine kurzfristige Störungsbearbeitung seitens der Telekom nicht vertraglich geregelt ist, so wie es bei der

ersten Variante mit den Standleitungen der Fall war (garantierte Behebung einer Störung innerhalb von 24 Stunden mit anschließender Fertigmeldung), kann es unter ungünstigen Umständen zu solchen langen Unterbrechungen kommen. Die DSL-Verbindungen funktionieren bisher sehr gut, dafür müssen aber in (seltenen) Störungsfällen auch lange Ausfallzeiten in Kauf genommen werden. Laut der Aussage von EDV-Mitarbeitern (AV) wird der Entstörung von Standard-DSL-Verbindungen seitens der Telekom keine hohe Priorität eingeräumt. Bisherige Erfahrungen bestätigen das.

#### 10.2.4 GPRS / UMTS

Da beim RÜB Talstraße kein DSL verfügbar ist, kommt dort seit September 2010 eine Lösung mit GPRS bzw. UMTS zum Einsatz. GPRS ist ein Dienst, der freie GSM-Kapazitäten (Handy-Netz) zur paketorientierten Datenübertragung nutzt. Zunächst wird nur GPRS-Empfang erkannt, bei späteren Kontrollfahrten kann ein schwaches UMTS-Signal ausgemacht werden. Von den verfügbaren Verbindungsarten (GPRS mit/ohne EDGE, UMTS) wird automatisch die schnellstmögliche Kopplung ausgewählt. Kommt es im Betrieb zu Übertragungsschwierigkeiten mit UMTS, gibt es einen „Rückfall“ zur GPRS-Technik mit geringerer Bandbreite. Ein solcher Rückfall würde die Kanalnetzsteuerung nicht beeinträchtigen, da ein ordnungsgemäßer Betrieb auch bei geringerer Übertragungsgeschwindigkeit gewährleistet ist.

Laut vorliegender Abrechnung für GPRS kostet der Datenservice 25 EUR im Monat und beinhaltet ein Volumenbudget von 307.200 kByte, was für einen Standort der Kanalnetzsteuerung auskömmlich ist.



**Abbildung 143: Schaltschrank RÜB Talstraße mit GPRS-/UMTS-Komponenten**      **Abbildung 144: Schaltschrank innen**

Mittig auf dem rechten Bild ist der UMTS-Router mit gängiger SIM-Karte zu erkennen. Links daneben ist ein Switch (Kopplungselement) montiert. Das würfelförmige Bauteil darunter ist eine neuartige ethernetfähige SPS (XC-CPU-201), welche direkt (über Suconet-K /RS485) an die vorhandene RÜB-Steuerung angebunden worden ist. Auf diese Weise werden zwei zusätzliche Schnittstellen-/Umsetzermodule eingespart und damit der Einbauaufwand minimiert. Das linke Bild zeigt die Frontansicht des geschlossenen Schaltschranks.

## 10.2.5 Empfehlungen

Da die analogen Standleitungen aufgrund hoher Kosten und niedriger Übertragungsgeschwindigkeit nicht mehr zeitgemäß sind und zudem auch gar nicht mehr angeboten werden, ist es uninteressant genauer auf deren Verfügbarkeit einzugehen.

Digitale Standleitungen (Primär Multiplex) zu einem angemessenen Preis sind eine denkbare Alternative. Im Projekt wird diese Verbindungsart aus Kostengründen nicht eingesetzt.

Die Verbindungsart mit ISDN-Anwahlmodem ist aufgrund mangelhafter Zuverlässigkeit nicht zu empfehlen. Dem gegenüber erweisen sich die aktuell verwendeten Verbindungstypen (DSL, GPRS/UMTS) wegen folgender Punkte als zweckmäßig und vorteilhaft:

- nachweislich hohe Verfügbarkeit
- kostengünstig durch Abrechnung nach Datenvolumen bzw. Pauschalpreis
- gute Datensicherheit (verschlüsselte VPN-Tunnel)
- eindeutige Kostenzuordnung möglich
- große Bandbreite

Für einen störungsarmen Weiterbetrieb der Kanalnetzsteuerung nach dem Forschungszeitraum kann in Erwägung gezogen werden, alle DSL-Verbindungen zusätzlich mit einer installierten GPRS/UMTS-Anbindung abzusichern. Diese Option würde dann nur bei gestörter DSL-Konnektivität zum Einsatz kommen. Gesehen den Fall, dass keine Störung auftritt, gibt es kein zu übertragendes Datenvolumen und es würden lediglich Bereitstellungskosten fällig.

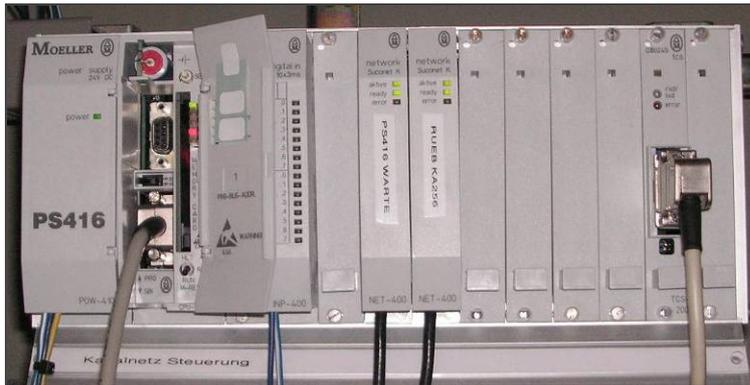
## 10.3 KANNST-SPS

Übergeordnetes Kernstück der Kanalnetzsteuerung ist der Regler-PC mit installiertem Regler-Projekt (Software). Er befindet sich zusammen mit dem Daten-PC im Server-Schrank der Kläranlagenwarte in Homburg-Bröl. Der Schrank ist abschließbar, das Öffnen der Türen wird der EDV-Abteilung (AV) automatisch gemeldet.

Sowohl der Regler-PC als auch der Daten-PC sind über „OPC“ mit der KANNST-SPS verbunden. OPC ist ein Standard zur herstellerunabhängigen Kommunikation in der Automatisierungstechnik über eine Software-schnittstelle. Um eine hardwareseitige Trennung von Projekt- und Kläranlagensteuerung zu erreichen, wird für KANNST eine eigenständige „Möller PS416“ installiert.



Abbildung 145: Serverschrank mit Regler- und Daten-PC



**Abbildung 146: KANNST-SPS**

Die Einbettung der oben abgebildeten KANNST-SPS in die globale Struktur des gesamten Datenverkehrs im Projekt wird zu Beginn dieses Kapitels beschrieben. Die KANNST-SPS ist ein Knotenpunkt im Hinblick auf den regelungsinternen Datenverkehr. Sie steuert den automatischen Datenaustausch mit den Betriebspunkten. Außerdem ist es ihre Aufgabe die Daten umzuwandeln (z.B. Messwerte skalieren), aufzubereiten und logisch zu verknüpfen. Es besteht die Möglichkeit das laufende SPS-Programm von Rechnern im AV-Netz aus, mit Hilfe eines speziellen Fernwartungsprogramms (Redirector), online zu inspizieren. Auf diesem Weg können eventuell auftretende Störungen leichter lokalisiert werden. Auch kleinere Programmänderungen können so durchgeführt oder ein Neustart initiiert werden.

Die folgende Abbildung ist als Ausschnitt aus dem Gesamtsystem zu sehen. Sie zeigt die zentrale Position der SPS mit angeschlossenem Regler- und Daten-PC innerhalb der Kanalnetzsteuerung. Während der Daten-PC fast ausschließlich Daten von der SPS empfängt, erfolgt der Datenverkehr zwischen Regler-PC und SPS bidirektional (siehe untere Abbildung „Anbindung KANNST-SPS“). Die Richtungen des Datenflusses ergeben sich aus den Aufgaben beider Rechner. Messwertverläufe und Meldungen von den Betriebspunkten werden an die KANNST-SPS gesendet. Von der SPS werden sie dann an Regler- und Daten-PC weitergereicht.

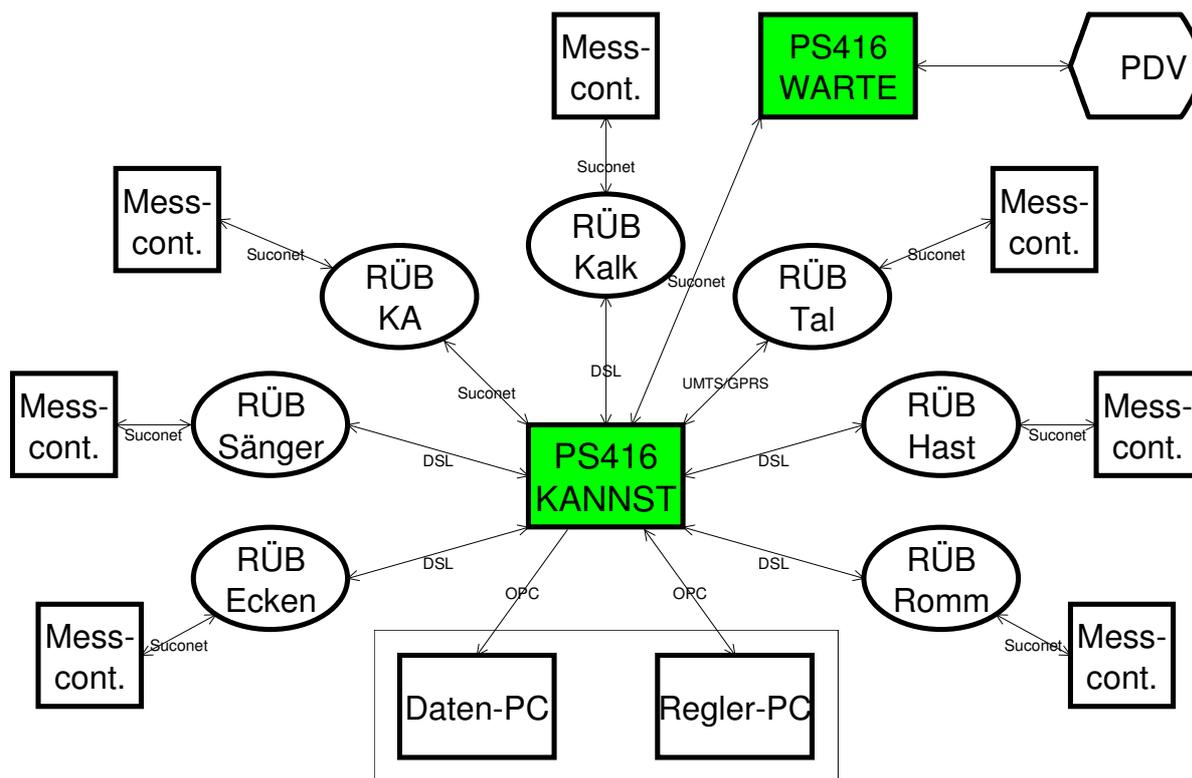


Abbildung 147: Anbindung KANNST-SPS

Auf beiden Computern sind Datenbanken zur Aufzeichnung von Messwerten und Zustandsmeldungen angelegt, die für die Regelung von Bedeutung sind. Diese redundante Aufzeichnung erhöht die Datensicherheit. Der Regler-PC verfügt über umfassendere Funktionen: Er verarbeitet Istwerte und Statusmeldungen und sendet Sollwerte über die SPS zurück an die Betriebspunkte. Außerdem werden Meldungen und Sollwerte über die SPS „Kläranlagenwarte“ an die PDV gesendet. So werden beispielsweise die Regelungsart (Stufe 1/2/3 bzw. Fracht/Konzentration), Zustand der Statemachine (1-8), Reglerzustand (Regler/MMI) und Drosselwassermengen-Sollwerte zur PDV übertragen. Auf diesem Weg können die wichtigsten Parameter über das Prozessleitsystem an speziellen Terminals eingesehen werden. Die Regelung kann über die PDV manuell mit oberster Priorität ausgeschaltet werden, damit in kritischen Fällen schnell interveniert werden kann. Nach Abschaltung werden anstelle von variablen Drosselwassermengen wieder statische Durchflüsse vorgegeben. Ein automatisches Wiederanlaufen ist nicht möglich, die Regelung muss zunächst von Hand über die PDV erneut eingeschaltet werden.

Die oben beschriebene KANNST-SPS ist mit den RÜB-Steuerungen verbunden, die wiederum an die Messcontainer-Steuerungen angeknüpft sind. Die nächste Abbildung zeigt beispielhaft die Topologie der Steuerungselemente eines Messcontainers (grau umrahmt). Folgende Bauteile der Firma Möller gehören dazu:

- PS4-201: Container-SPS
- LE4-501-BS1: Netzwerkmodul, Suconet-K
- LE4-206-AA2: Analoges Ein-/Ausgangsmodul
- LE4-116-DX1: Digitales Eingangsmodul
- LE4-116-DD1: Digitales Ein-/Ausgangsmodul

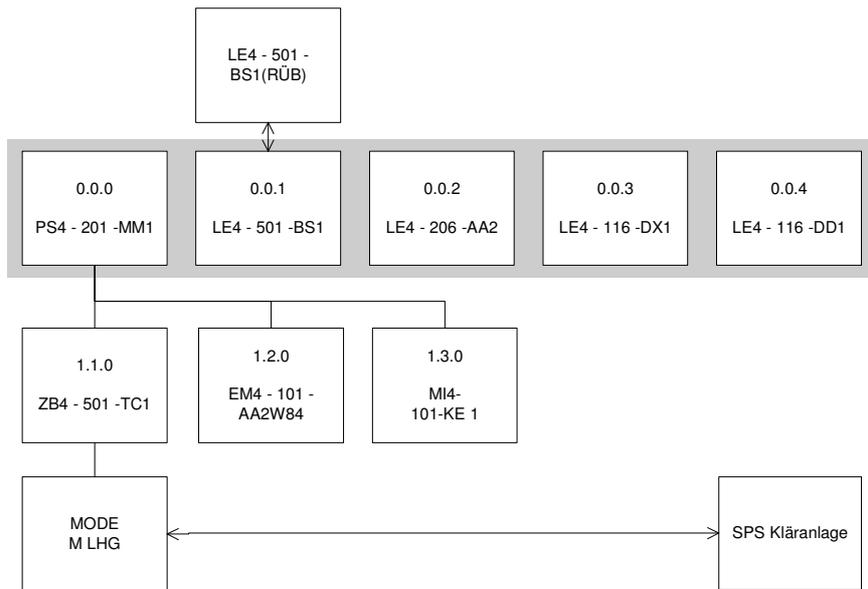


Abbildung 148: SPS-Topologie Messcontainer

## 11 Maßnahmen gegen Fehlsteuerungen - Sicherheitskonzept

Für den sicheren Betrieb einer Kanalnetzsteuerung sind unter Berücksichtigung der wasserrechtlichen Vorgaben im Vergleich zu einem ungeregelten Netz zusätzliche Vorkehrungen zu treffen. In dem vorliegenden Kapitel wird zunächst auf Vorgehensweisen eingegangen, die bei bestimmten Störungsszenarien automatisch eingeleitet werden. Dazu wird in einem ersten Abschnitt erläutert, wie die Kanalnetzsteuerung prinzipiell mit möglichen Fehlern umgeht.

Anschließend folgt eine Beschreibung der hierarchisch angeordneten Sicherheitsebenen:

- Prozessleitsystem (PDV)
- Regler-PC
- KANNST-SPS
- RÜB-Steuerung

Ein zweiter Abschnitt behandelt die Umsetzung der einzelnen Ebenen, deren Verzahnung miteinander und ihren Anteil am Gesamtkonzept.

### 11.1 Strategie im Störfall

In der Praxis sind Fehler und Betriebsstörungen nicht vollständig auszuschließen. Fehlen wirksame Maßnahmen im Störfall, erhöht der Betrieb einer Kanalnetzsteuerung das Risiko für unerwünschte Auswirkungen. So können beispielsweise höhere Drosselwassermengen als bei der Planung ursprünglich vorgesehen eine Überlastung des Netzes begünstigen. EDV-Anlagen und Datenübertragungswege, die zusätzlich zum ungeregelten Netz erforderlich sind, können zeitweise gestört sein oder gar vollständig ausfallen. Damit derartige Szenarien keine schädlichen Folgen für Mensch und Umwelt nach sich ziehen, muss der Betreiber dem erhöhten Risiko mit einer situativ angepassten Sicherheitsstrategie begegnen. Dazu muss zunächst analysiert werden, welche Fehler denkbar sind, wie häufig sie vorkommen und welche Auswirkungen auftreten können. Anschließend wird in einem zweiten Schritt jedem Fehlerfall eine geeignete Maßnahme zugeordnet.

Beim KANNST-Projekt sehen diese Maßnahmen für verschiedene Fehlerarten wie folgt aus:

1. Vollständiges Abschalten der gesamten Regelung, Betrieb als ungeregeltes Kanalnetz mit konstanten Drosselwassermengen.
2. Strangweise Abschaltung der Regelung.
3. Einzelne RÜB werden aus der Regelung herausgenommen und mit einer konstanten Drosselwassermenge betrieben. Die Betriebspunkte ohne Störung werden weiterhin geregelt.

Bei der Zuordnung wird darauf geachtet, dass die Regelung nicht unnötig wegen eines verhältnismäßig kleinen Fehlers, der dazu noch mit keinen nennenswerten Risiken verbunden ist, vollständig außer Betrieb gesetzt wird. Bei schwerwiegenden Fehlern muss hingegen kompromisslos und umfas-

send eingegriffen werden. Zur Verdeutlichung folgen hypothetische Beispiele für Störungsszenarien, auf die jeweils mit einer der obigen Optionen 1 bis 3 reagiert wird.

- Annahme: Am Wochenende wird in der Wasserleitstelle eine gravierende Regler-Fehlfunktion signalisiert. Z.B. Einstau eines RÜB bei Trockenwetter mit drohendem Überlauf (sehr unwahrscheinlich, aber großes Schadenpotential). Hier wird manuell über das Prozessleitsystems die komplette Regelung abgeschaltet. Diese Form der Intervention hat oberste Priorität, d.h. die Regelung kann von keinem anderen Ort aus - auch nicht versehentlich - reaktiviert werden.
- Annahme: Kabelbruch Füllstandsmessung RÜB Hast. In diesem Fall werden unplausible Messwerte erkannt, weil deutlich negative Füllstände unzulässig sind. Da die Füllstände der RÜB zu den essentiellen Eingangsgrößen gehören, ist ohne sie keine sinnvolle Regelung möglich. Wird der Fehler nicht erkannt, so besteht mit aktiver Regelung ein Gefährdungspotential wegen eines vermeintlich leeren RÜB. Als Reaktion auf diesen schwerwiegenden Fehler wird die Regelung im gesamten Strang Waldbröl abgeschaltet (s. nebenstehende Abbildung). Die Maßnahme der strangweisen Abschaltung wird am häufigsten genutzt.

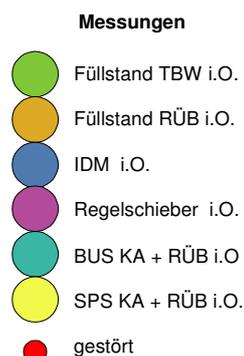


Abbildung 149: Legende

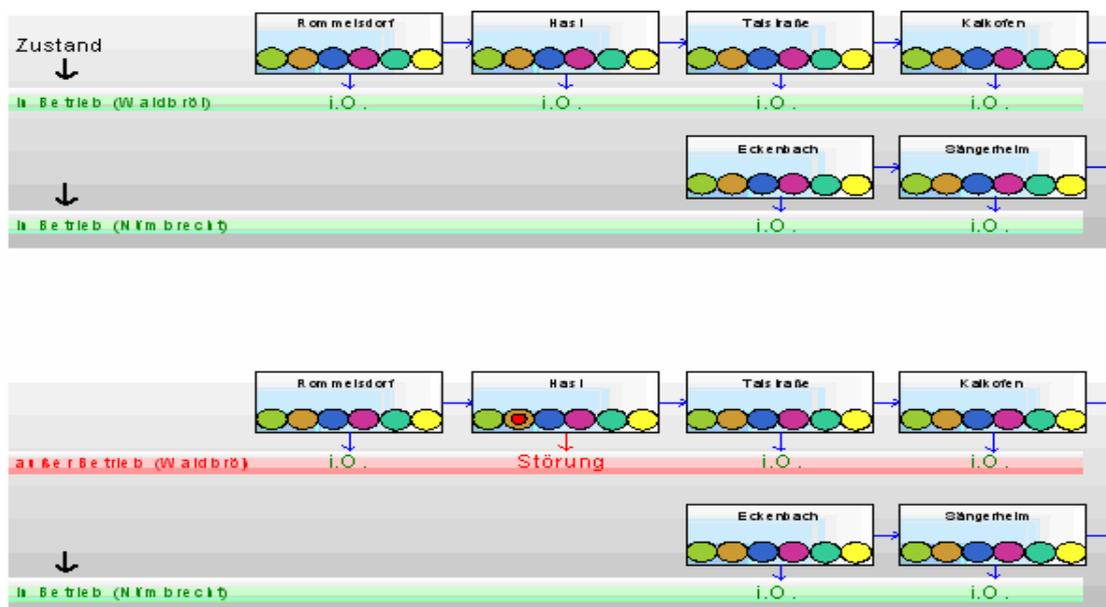


Abbildung 150: Abschaltung Strang Waldbröl bei einem schwerwiegenden Fehler

- Annahme: Eine Störung der Verbindung vom Messcontainer zur RÜB-Steuerung liegt vor. Wenn die Kopplung zwischen RÜB-Steuerung und Messcontainer-SPS gestört ist, gelangen u.a. keine Messwerte mehr von den Onlinemessungen zum Regler-PC auf der Kläranlage. Weil die Verbindung zwischen RÜB-SPS und KA weiterhin besteht, werden die wichtigen Größen „Füllstand“ und „Entlastungswassermenge“ nach wie vor übertragen. Akutes Gefährdungspotential besteht nicht. In einem solchen Fall reicht es aus, nur das von der Störung unmittelbar betroffene RÜB aus der Regelung herauszunehmen.

## 11.2 Realisierung von Sicherheitsebenen

Zum Sicherheitskonzept gehören vier Schichten, die unterschiedlichen Betriebsarten und Systemen zugeordnet werden können: PDV, Regler-PC, KANNST-SPS, RÜB-SPS.

Durch Vernetzung in Kombination mit Verbindungsüberwachungen (Checktakt) wird dafür gesorgt, dass selbst der Ausfall kompletter Ebenen (Ausnahme: Ausfall RÜB-Steuerung) kompensiert werden kann. Es kommt nicht zu gefährlichen, undefinierten Zuständen. Die zum Projekt gehörenden RÜB-Steuerungen sind mittels USV gegen Stromausfälle abgesichert. Unerwünschte Folgen sind daher deutlich unwahrscheinlicher als bei einem RÜB im unregelmäßigen Netz. Bei einem unregelmäßigen Netz ist die Schwere eines solchen Fehlers ebenfalls hoch einzuschätzen. Dort gibt es in der Regel aber keine Möglichkeit, bei Stromausfall den für die Drosselwassermengen zuständigen Regelschieber mittels Akku-Betrieb auf eine definierte Position zu fahren.

### 11.2.1 PDV

Die Prozessdatenverarbeitung ist oberste Instanz. Von angeschlossenen Terminals können Mitarbeiter mit entsprechender Berechtigung (z.B. in der ständig besetzten Wasserleitstelle) die gesamte Kanalnetzsteuerung außer Betrieb nehmen. Das System protokolliert welcher Mitarbeiter zu welcher Zeit einen solchen Eingriff vorgenommen hat. Einstellungen auf anderer Ebene haben auf diese globale Abschaltung keinen Einfluss.

Betriebsart-Umschaltung 0=Regler/1=MMI						
<b>0</b>						
Strang Waldbröl						
Zustand						
<b>1</b>	Sollwert	Betriebsart	Füllstand Becken TBW		Qd l/s	Entl. l/s
Rommelsdorf	15	Regler	0.9	1.2	-0.0	0.0
Hast	40	Regler	0.2	-0.2	-0.0	0.0
Talstraße	55	Regler	6.3	-0.2	1.4	0.0
Kalkofen	65	Regler	12.5	0.0	-0.0	0.0

Abbildung 151: Reglerabschaltung über PDV

### 11.2.2 Regler-PC

Auch der Regler-PC hat einen Anteil am Gesamtkonzept gegen Fehlsteuerungen. Mittels Simulationen (SIMBA) werden erweiterte Bereiche für Drosselwassermengen ermittelt, die das Kanalnetz nachweislich nicht überlasten, der Regelung aber erweiterten Handlungsspielraum ermöglichen (s. untere Abbildung).



Abbildung 152: Standardnetzplan und Erweiterung

Ein einwandfrei funktionierender Regler-PC gibt Sollwerte für Drosselwassermengen innerhalb des zulässigen Bereiches aus. Zusätzlich ist eine KOSTRA-Tabelle zur Klassifikation von Niederschlags-

eignissen im Einzugsbereich der Kläranlage Homburg-Bröl hinterlegt. Niederschlagsereignisse werden laufend im Abgleich mit der Tabelle bewertet. Bei extremen Ereignissen mit einer Wiederkehrzeit größer als ein Jahr, wird zum Schutz neuralgischer Punkte im Netz die gesamte Regelung inaktiv geschaltet (Statemachine: Zustand 8 „kein Regelungspotential“, konventioneller Betrieb nach aktuell genehmigtem Netzplan ohne Steuerung).

### 11.2.3 KANNST-SPS

Die KANNST-SPS überprüft die vom Regler-PC ausgegebenen Werte auf Plausibilität. Wenn der Sollwert für ein RÜB nicht im erlaubten Rahmen liegt (5 l/s bis max.  $Q_d$ ), wird die Regelung des betroffenen Stranges abgeschaltet (Sollwertbegrenzer). In der Praxis kommt es vor, dass durch eine Fehlfunktion die Drosselwassermenge „0 l/s“ ausgegeben wird. Dies wird durch den „Absturz“ des Programms „IPCOIN-Server“ ausgelöst (kann unter Umständen bei SPS-Programmänderungen auftreten). Der Sollwertbegrenzer erkennt das Problem, da Sollwerte unter 5 l/s unzulässig sind. Er erzeugt eine Störmeldung und verhindert wirksam einen unbeabsichtigten Beckeneinstau.

Mittels Checktakt wird die OPC-Verbindung zwischen Regler-PC und SPS überwacht. Bei einem Verbindungsabbruch („Störung Regler-PC“), wird für alle angeschlossenen RÜB das Signal zum ungeregelten Betrieb ausgegeben. Weitere wichtige Sicherheitsüberprüfungen werden ebenfalls von der KANNST-SPS abgewickelt. Die unten stehende Liste gibt einen Überblick zu den berücksichtigten Elementen. Alle Stichpunkte bleiben unkommentiert, da die prinzipielle Vorgehensweise analog zu den bereits beschriebenen Beispielen ist.

- Plausibilitätsprüfung Messwerte: RÜB Füllstand, Trennbauwerk Füllstand, Drosselwassermenge, Entlastungwassermenge
- Plausibilitätsprüfung: Verknüpfung von Messwerten (z.B. „Füllstand RÜB < 90 % und Entlastung ein“ deutet auf eine Störung hin)
- Prüfung auf anstehende Störmeldungen von den RÜB: Schieber, Drehmoment Antrieb Schieber, Messtechnik, Unterschreitung Drosselwassermenge, USV-Betrieb, Störung USV
- Buskopplungsstörung zur KA-SPS, Buskopplung RÜB-SPS, Buskopplung Messcontainer

### 11.2.4 RÜB-Steuerung

Für den Fall, dass übergeordnete Einrichtungen des Sicherheitskonzepts nicht greifen, können unerwünschte Auswirkungen von Fehlfunktionen auf RÜB-Ebene wirksam verhindert werden. Beispielsweise gibt es häufige Verbindungsabbrüche bei der störungsanfälligen ISDN-Wählverbindung. Ein Verbindungsabbruch wird von der RÜB-SPS erkannt. Weil im konkreten Fall keine Reglervorgaben empfangen werden können, erfolgt hier eine Umschaltung auf statische Drosselwassermengen. Die erlaubte Durchflussmenge ist in jedem RÜB-SPS-Programm vor Ort hinterlegt (über MI4-Display einstellbar).

Folgende Sicherheitsabfragen werden zusätzlich von der RÜB-Steuerung vorgenommen:

- Kopplung zum KANNST-Messcontainer (Checktakt)
- USV-Betrieb

- Prüfung, ob die generelle Freigabe zum Regeln von KANNST-SPS und PDV vorliegt

### 11.3 Fazit Sicherheitskonzept

Das Sicherheitskonzept funktioniert zuverlässig, im gesamten Projektverlauf verursachen Störungen keine kritischen Folgen. So erfolgt z.B. keine Entlastung eines RÜB bei Trockenwetter und es sind auch keine Kanalnetzüberlastungen mit Wasseraustritten an Schächten zu verzeichnen. Das ist neben den Wetterverhältnissen auch der defensiv ausgerichteten Strategie in Verbindung mit dezidiertem Abschaltung im Fehlerfall auf gestaffelten Ebenen zu verdanken. Dafür wird in Kauf genommen, dass die Kanalnetzsteuerung aufgrund der Maßnahmen gegen Fehlsteuerungen zeitweise vollständig, strangweise oder an einzelnen RÜB ungeregelt betrieben werden muss. Abschaltungen während Regenereignissen können sich dabei ungünstig auf die Gesamtbilanz „Regler-Effizienz“ auswirken.

## 12 Softwareumgebung iPCOIN

iPCOIN<sup>52</sup> ist eine spezielle Softwareplattform, welche von der GECO ► C<sup>53</sup> Forschungsgruppe zur Steuerung von Kläranlagen, Biogasanlagen und Kanalnetzen entwickelt worden ist. Sie wird erfolgreich seit einigen Jahren auf unterschiedlichen Kläranlagen eingesetzt. iPCOIN zeichnet sich durch eine flexible Anwendbarkeit aus. Die Software ist nicht auf ein bestimmtes steuerungstechnisches Verhalten festgelegt, sondern stellt vielmehr ein visuelles Programmierwerkzeug dar, mit dem das Verhalten und der Programmablauf durch Verbinden von Funktionsbausteinen festgelegt werden kann. Eine weitere Besonderheit von iPCOIN ist die Trennung von Benutzeroberfläche und Funktionalität. iPCOIN besteht aus zwei separaten Funktionsteilen, der Benutzeroberfläche iPCOIN Client und dem iPCOIN Server, der die Funktionalität beinhaltet. Die Benutzeroberfläche kommuniziert dabei über TCP/IP mit dem iPCOIN Server. Dies ermöglicht eine komfortable Fernsteuerung und Überwachung der Softwareplattform über ein Datennetz. Im Folgenden werden die beiden Funktionsteile iPCOIN Server und iPCOIN Client dargestellt und im Anschluss wird die programmiertechnische Funktionsweise im Projekt KANNST beschrieben.

### 12.1 iPCOIN Server

Der iPCOIN Server (Abbildung 153) stellt die Basis der Softwareplattform dar. Alle regelungs- und steuerungstechnischen Berechnungen werden hier vorgenommen. Da die eigentliche Konfiguration und Programmierung des Servers über den Client geschieht, zeigt die Programmoberfläche nur die notwendigsten Informationen wie Log-Ausgaben und Statusinformationen des Servers. Vorgefertigte Projekte können direkt über den Server geladen und gestartet werden.

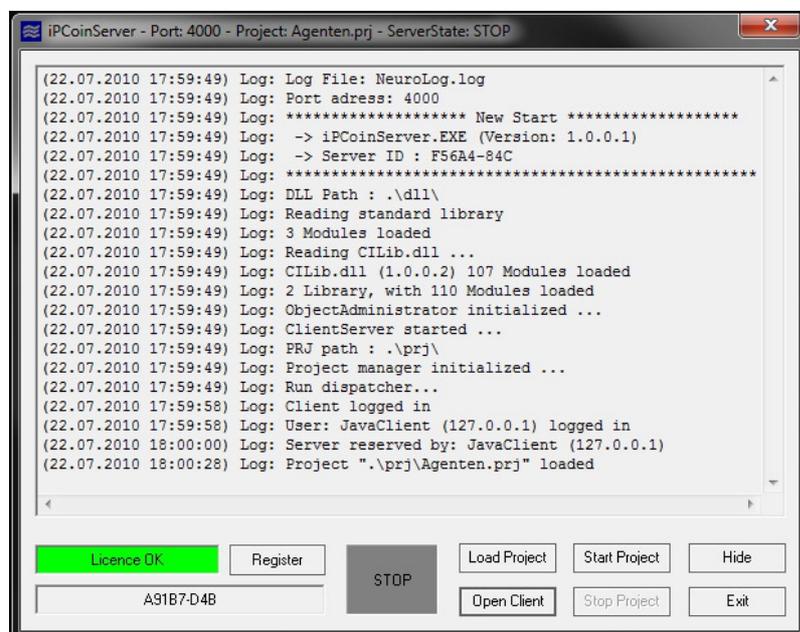


Abbildung 153: iPCOIN Server

<sup>52</sup> Intelligent process control integration

<sup>53</sup> GummersbachEnvironmental Computing Center

## 12.2 iPCOIN Client

Der iPCOIN Client (Abbildung 154) ist die Benutzeroberfläche der iPCOIN Softwareplattform. Über ein Anmeldefenster verbindet sich der Benutzer mit dem Server. Ist die Anmeldung erfolgreich, öffnet sich die Benutzeroberfläche und der Client ist im Beobachtungsmodus. In diesem Modus kann der Benutzer geladene Projekte sehen und Statusmeldungen empfangen. Um Änderungen am Server vorzunehmen, muss der Client zunächst die Kontrolle über den Server erhalten. Der Benutzer veranlasst dies durch Betätigung des Buttons „Kontrolle übernehmen“. Nun ist der Benutzer in der Lage den Server zu verwalten. In diesem Zustand kann man ein Projekt laden, starten und stoppen. Um Änderungen an Projekten vorzunehmen, wechselt der Benutzer durch aktivieren des „Editieren“ Buttons in den Editiermodus. Nun kann der Benutzer sein Projekt aufbauen und konfigurieren. Einzelne Funktionalitäten werden durch Module repräsentiert. Das Verknüpfen der Module bestimmt den Datenfluss. Neue Module können per „Drag and Drop“ aus der Bibliothek hinzugefügt werden. Optionen werden über modulspezifische Fenster definiert, die über einen Doppelklick auf ein Modul geöffnet werden.

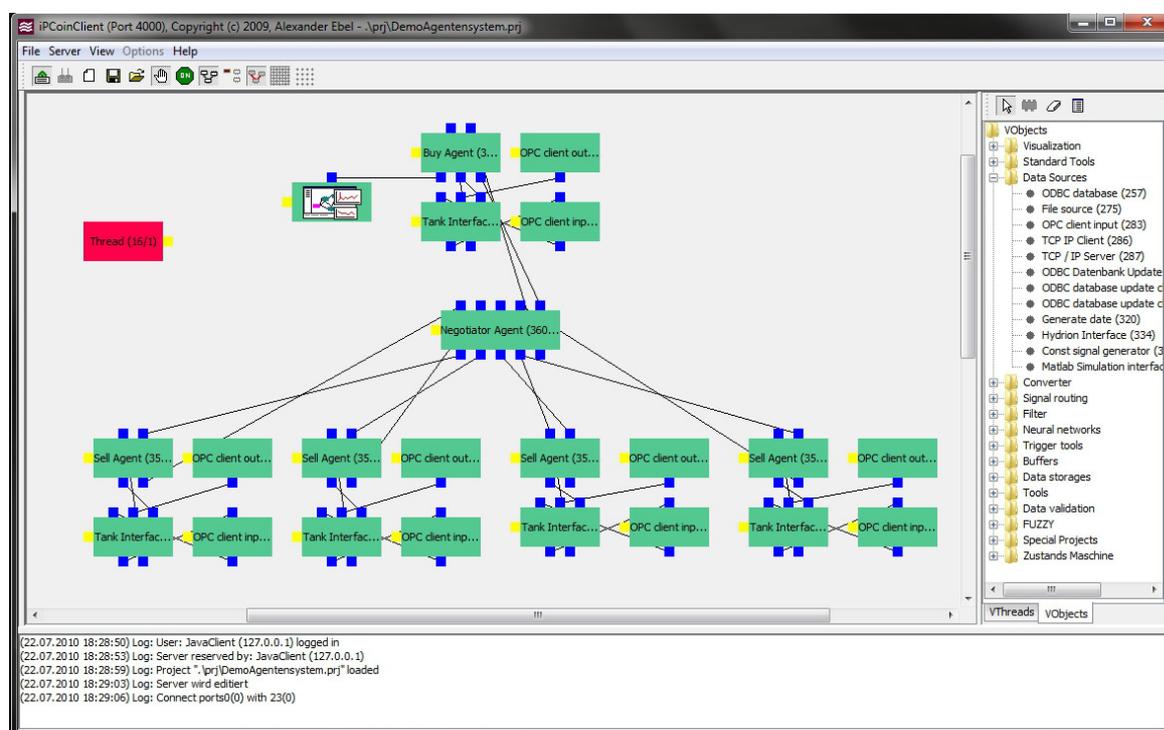


Abbildung 154: iPCOIN Client

## 12.3 Ein iPCOIN Programm

Sowohl einfache als auch komplexe Softwarefunktionen sind in iPCOIN in Module gekapselt. Die Module enthalten z.B. mathematische Operationen, Neuronale Netze, Datenbankzugriff und OPC<sup>54</sup> Zugriff.

<sup>54</sup> OLE for Process Control (OLE – Object Linking and Embedding). OPC ist eine standardisierte Datenanbindung für Automatisierungskomponenten.

Ein Funktionsmodul besitzt einen oder mehrere Eingänge und Ausgänge zum Senden und Empfangen von Daten sowie einen Thread Port. Durch die Verknüpfung der Eingänge und Ausgänge werden die Funktionsmodule in Beziehung gesetzt. Hierbei werden Daten immer von einem Ausgang zu einem Eingang gesendet. Das verwendete Datenformat ist das DoubleArrayData-Format. Die Ausführung eines Funktionsmoduls geschieht durch den Empfang von Daten an einem seiner Eingänge. Eine Ausnahme stellt das Timer Modul dar, welches im Gegensatz zu den restlichen Funktionsmodulen einen zusätzlichen internen Timerthread besitzt. Dieses Modul erzeugt aktiv Trigger Signale die eine Ausführung anderer Funktionsmodule anstößt.

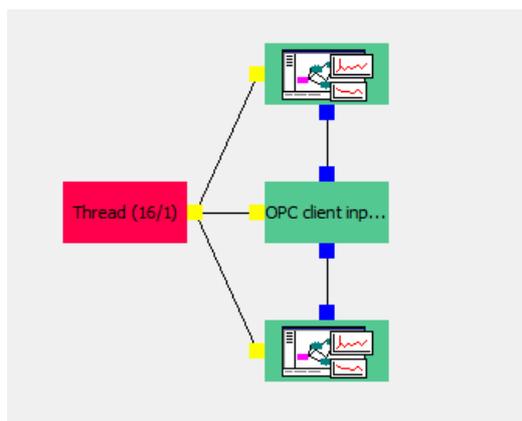


Abbildung 155: iPCOIN Module

Abbildung 155 zeigt ein einfaches Beispiel für ein Projekt zur Darstellung aktueller OPC Messwerte. Das unterste Modul ist ein Timer Modul, welches in zyklischen Abständen Triggersignale generiert. Diese Triggersignale starten die Ausführung des OPC Client input Moduls, welches bei jedem Triggerzyklus Daten vom OPC Server ausliest. Diese Daten werden anschließend zur Visualisierung gesendet, welche die empfangenen Messwerte grafisch darstellt.

Eine Besonderheit in einem iPCOIN Projekt ist das Thread-Modul (in Abbildung 155, rot dargestellt). Ein Funktionsmodul an sich besitzt noch keine Zuordnung zu einem Thread. Durch Verknüpfung des Thread Ports mit einem Thread-Modul wird das Funktionsmodul einem Thread zugeordnet. Das Thread-Modul stellt den Funktionsmodulen aktive Rechenzeit zur Verfügung. Sind mehrere Funktionsmodule mit einem Threadmodul verknüpft, so teilen sich diese Funktionsmodule die Rechenleistung eines Threads. Sollen Funktionsmodule zeitlich parallel ausgeführt werden, so ist es möglich dem Projekt zusätzliche Threadmodule hinzuzufügen. Die Funktionsmodule die parallel ausgeführt werden sollen, werden unterschiedlichen Threadmodulen zugeordnet.

## 12.4 Umsetzung der Kanalnetzregelung in iPCOIN

Die Kanalnetzregelung wird in der Regelungssoftware iPCOIN umgesetzt. Die einzelnen Datenverarbeitungs- und Berechnungsschritte können in einzelne, funktionale Abschnitte eingeteilt werden, die nachfolgend beschrieben werden.

### 12.4.1 Messwerterfassung und Vorverarbeitung

Die folgende Abbildung zeigt den Aufbau der Messwert-Erfassung und eine erste Vorverarbeitung der Daten. Die Zahlen 1 bis 3 in der Grafik stehen für einzelne Programmabschnitte, auf die im weiteren Verlauf näher eingegangen wird.

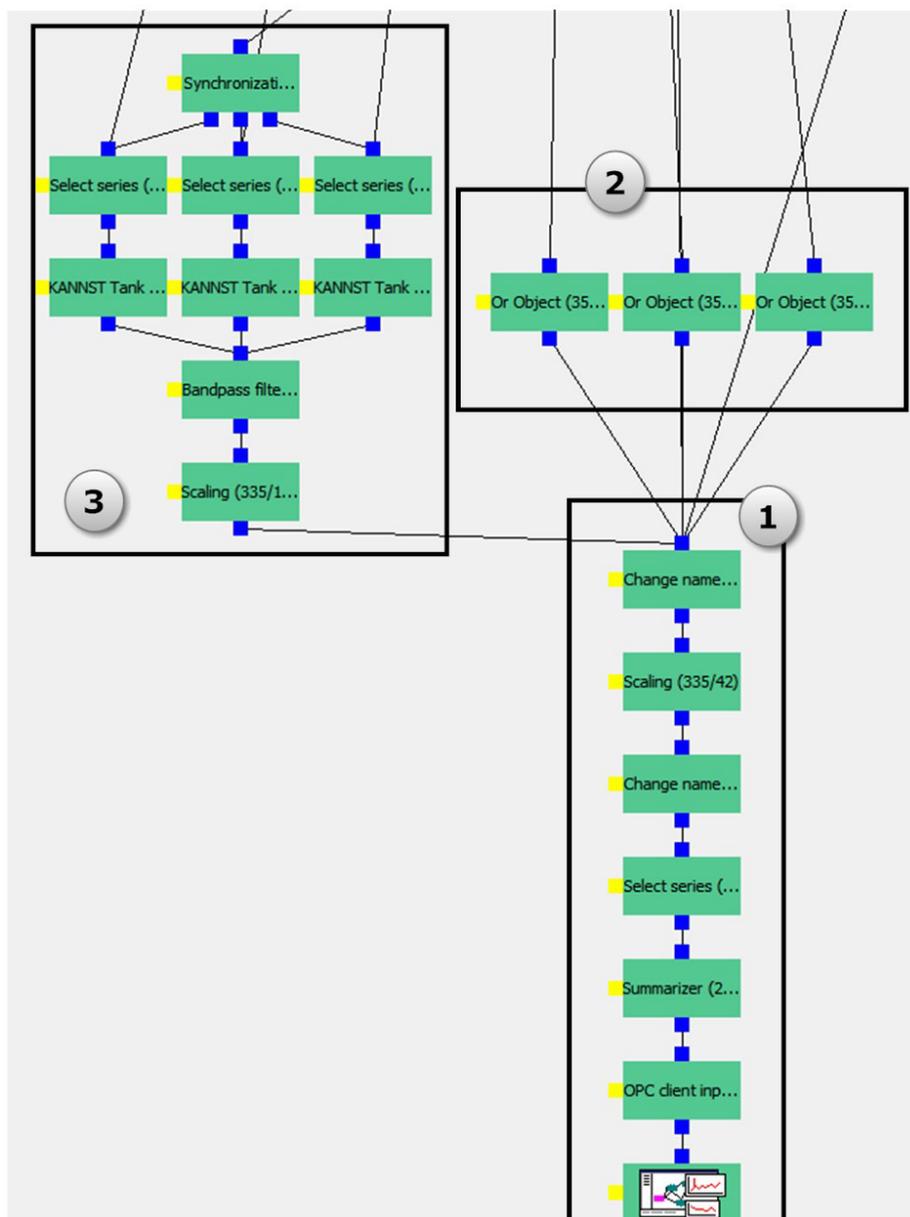


Abbildung 156: Datenerfassung

**Abschnitt 1:** Der Datenimport geschieht über das OPC Input Modul, welches von einem Timer einmal pro Minute getriggert wird. Das RÜB Kalkofen besitzt zwei Beckenabschnitte mit jeweils einer Füllstandsmessung. Zur Bestimmung des Gesamtfüllstands werden beide Messwerte zunächst addiert und in einem darauffolgenden Schritt entsprechend skaliert. Die übrigen Füllstandsmessungen werden direkt verwendet und mit Hilfe des Skalierungsmoduls aus dem Bereich  $[0 - 1]$  auf den Bereich  $[0 - 100]$  skaliert. Als letzte Umwandlung im Daten-

verarbeitungsschritt 1 werden die Datenreihen in eine, für den Benutzer verständlichere Bezeichnungsweise umbenannt.

**Abschnitt 2:** In diesem Abschnitt wird zuerst eine Zustandsbestimmung auf Pegel und Entlastungswerte der RÜB vorgenommen und drei Aktivator Variablen zugeordnet. AktivatorEntlast1 wird auf „1“ gesetzt, wenn eines der Becken entlastet. AktivatorEntlast3 wird auf „1“ gesetzt, wenn mindestens drei Becken entlasten und AktivatorFuell wird auf „1“ gesetzt, wenn eines der Becken einen Füllstand grösser 80% erreicht. Diese Aktivatorvariablen werden später in der StateMachine für die Umschaltung zwischen Sommer-/Winter-/Fracht-/Mess- Regelung verwendet.

**Abschnitt 3:** Dieser Abschnitt berechnet die Konzentration und die Fracht in den Regenüberlaufbecken Hast, Talstraße und Kalkofen mittels speziell für das KANNST-Projekt entwickelten Modulen.

#### **12.4.2 Vorverarbeitung, Datensynchronisation und Datenbankexport**

Im Bereich Vorverarbeitung, Datensynchronisation und Datenbankexport geschieht eine weitere Vorverarbeitung der Daten. Ergebnisse aus den vorherigen Abschnitten werden synchronisiert und alle berechneten Daten werden in eine Datenbank übertragen (siehe Abbildung 157).

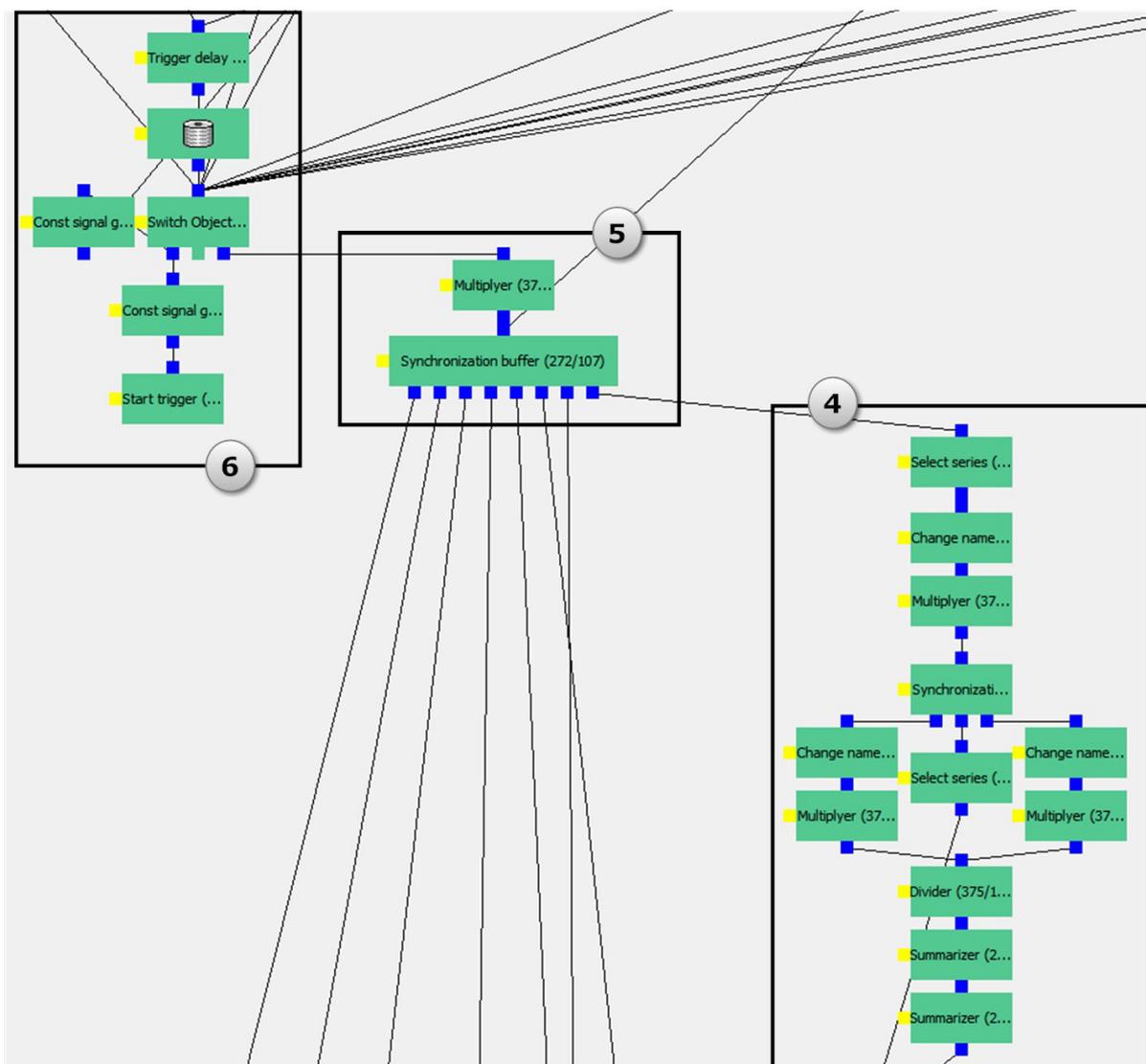


Abbildung 157: Vorverarbeitung

**Abschnitt 4:** Hier werden Konzentration und Fracht für die RÜB Kläranlage sowie Rommelsdorf berechnet:

$$\text{RomKonzentration} = (\text{Sum}(\text{HastKonz} + \text{TalKonz} + \text{KalkKonz}) / 3) * 0.45$$

$$\text{KAKonzentration} = (\text{Sum}(\text{HastKonz} + \text{TalKonz} + \text{KalkKonz}) / 3) * 0.96$$

$$\text{RomFracht} = \text{RomKonz} * \text{RomEntlastung}$$

$$\text{KAFracht} = \text{KAKonz} * \text{KAEntlastung}$$

**Abschnitt 5:** Abschnitt 5 dient der Datensynchronisation aus den vorherigen Vorverarbeitungsschritten.

**Abschnitt 6:** In diesem Abschnitt werden die bisher berechneten Daten in eine SQL Datenbank geschrieben. Dies geschieht über die ODBC Datenbankschnittstelle. Im Anschluss daran werden die entsprechenden Daten an weitere Datenverarbeitungsabschnitte gesendet.

### 12.4.3 KOSTRA Berechnung

Die KOSTRA-Tabelle definiert, ab welchem Niederschlagsverhalten es sich um ein mehrjähriges Niederschlagsereignis handelt. Nachfolgende Abbildung 6 zeigt die Berechnungsschritte für den KOSTRA Wert.

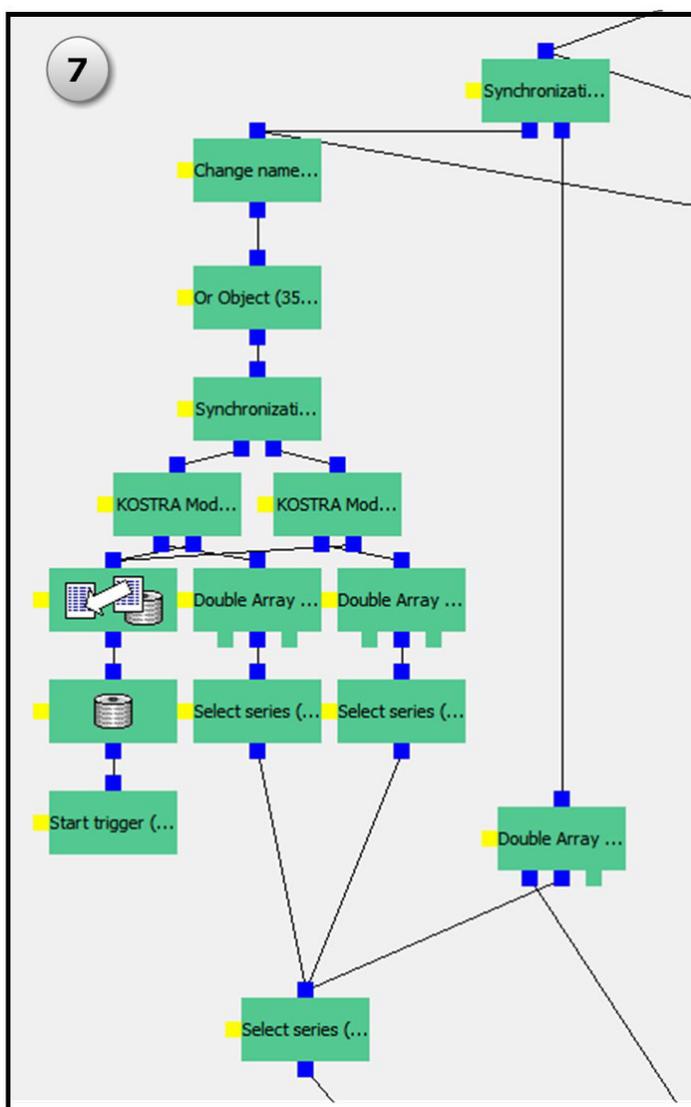


Abbildung 158: Kostra Berechnung

**Abschnitt 7:** Die KOSTRA-Tabelle ist in der SQL Datenbank gespeichert und wird über ein ODBC Datenimportmodul ausgelesen und an die KOSTRA Module weitergeleitet. Die Niederschlagswerte werden über zwei Niederschlagsmessungen erfasst und kategorisiert. Die Niederschlagswerte jeder Messung gehen als Eingang in jeweils ein KOSTRA Modul, welches die Jährlichkeit des Niederschlagsereignisses bestimmt. Wird in einem der beiden Module ein Ereignis festgestellt mit einer Jährlichkeit von größer einem Jahr, so wird diese Information entsprechend an die StateMachine weitergeleitet.

#### 12.4.4 StateMachine für Sommer-/Winterbetrieb

In der folgenden Abbildung werden die Zustände für die jahreszeitliche Umschaltung dargestellt. Im Falle des Stranges Waldbröl gilt dies zusätzlich für die Umschaltung zwischen Konzentrationsregelung und Frachtregelung.

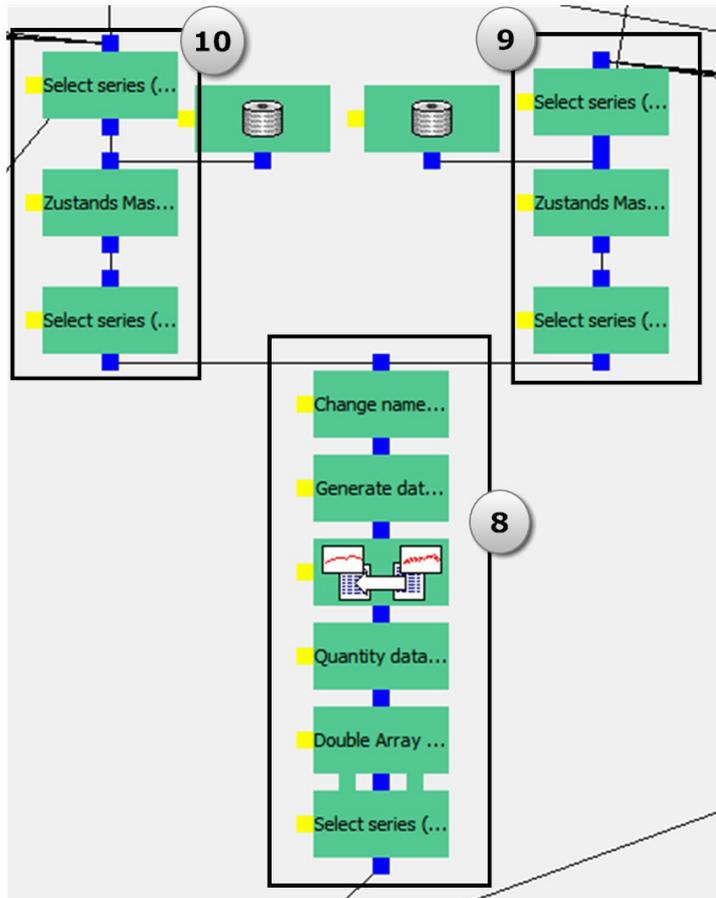


Abbildung 159: StateMachine

**Abschnitt 8:** Als Eingangsdaten der StateMachines für beide Stränge werden alle 30 Minuten Mittelwerte berechnet. Diese Berechnung erfolgt, indem 30 Werte in einem Ringspeicher gesammelt und anschließend gleitende Mittelwerte gebildet werden. Zusätzlich zu diesem Verarbeitungsschritt wird noch ein Zeitstempel generiert.

**Abschnitt 9:** Dieser Abschnitt beinhaltet die StateMachine für den Strang Waldbröl. Hier wird auf Basis von Messwerten und den vorher bestimmten Aktivator Informationen der aktuelle Zustand des Stranges Waldbröl bestimmt und im Anschluss an weitere Projektschritte geleitet. Beim Strang Waldbröl geschieht die Zustandseinteilung in Sommer-, Winter-, Konzentrations- und Frachtregelung. Mit Hilfe dieser Zustandseinteilung wird an späterer Stelle die entsprechende Auswahl der Fuzzyregler festgelegt. Die Ergebnisse der StateMachine werden in einer Datenbank gespeichert.

**Abschnitt 10:** Im Gegensatz zum Strang Waldbröl wird für den Strang Nümbrecht nur eine Einteilung in Sommer- und Winterzustand vorgenommen ohne Online-Messdaten. Die Ergebnisse der StateMachine werden in einer Datenbank gespeichert.

#### 12.4.5 Berechnung der Drosselstellwerte für den Strang Nümbrecht

Die Abbildung 160 zeigt die Bestimmung der Ablaufstellwerte (Drosselwassermengen) für den Strang Nümbrecht. Je nach Zustand des Kanalnetzstrangs werden die Stellwerte entweder fest vorgegeben oder dynamisch mit Hilfe von Fuzzyreglern bestimmt.

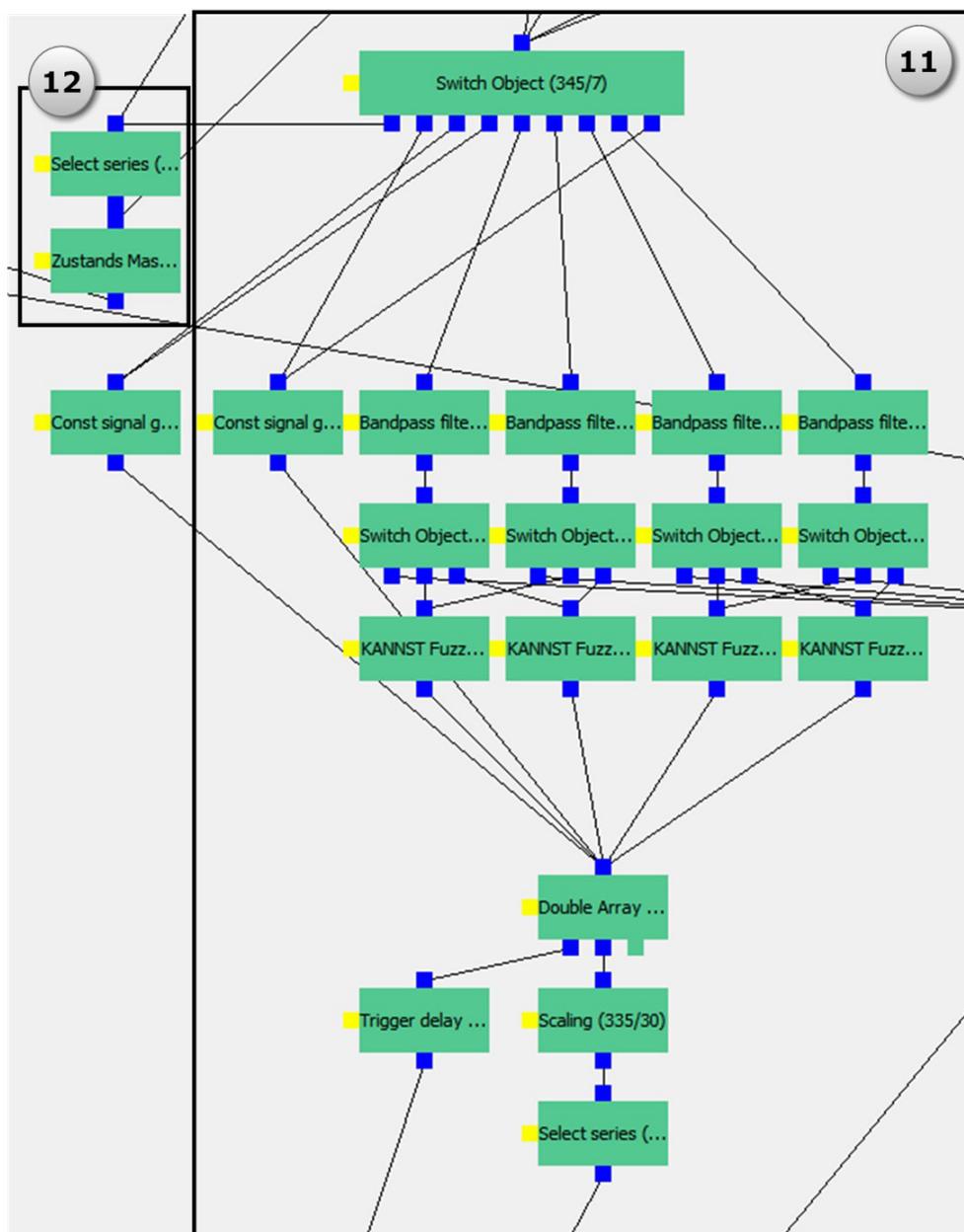


Abbildung 160: Drosselmengen (Qd) Berechnung Nümbrecht

**Abchnitt 11:** Die Eingangswerte der Fuzzyregler des Stranges Nümbrecht entsprechen den Füllständen der einzelnen RÜB. Zunächst werden die Füllstände auf den entsprechenden Eingangsbereich der Fuzzyregler skaliert. In den Switch Modulen hinter den Fuzzy Reglern wird zwischen Sommer- und Winter-Fuzzyregler umgeschaltet. Die entsprechende Information bekommt das Switch Modul von der bereits beschriebenen StateMachine für den Strang Nümbrecht. Anschließend erfolgt eine Grenzwertprüfung und die Daten werden an das zweite Switch Modul weitergeleitet. Dieses Switch Modul schaltet die entsprechenden Beckenstellwerte durch. Die Information, welcher Stellwert von welchem Fuzzyregler oder Fest-

stellwert weitergeleitet wird, wird von einer weiteren StateMachine in Abschnitt 12 bestimmt.

**Abschnitt 12:** In diesem Abschnitt befindet sich die StateMachine zur Bestimmung des Belastungszustandes des Kanalnetzes. Insgesamt wird zwischen acht Belastungszuständen unterschieden und es werden Beckenstellwerte dementsprechend weitergeleitet. Die Ergebnisse der StateMachine werden in einer Datenbank gespeichert.

#### 12.4.6 Berechnung der Drosselstellwerte für den Waldbröler Strang

Die Abbildung 161 zeigt die Bestimmung der Drosselstellwerte für den Strang Waldbröl. Auch hier werden je nach Zustand des Kanalnetzstrangs die Stellwerte entweder fest vorgegeben oder dynamisch mit Hilfe von Fuzzyreglern bestimmt.

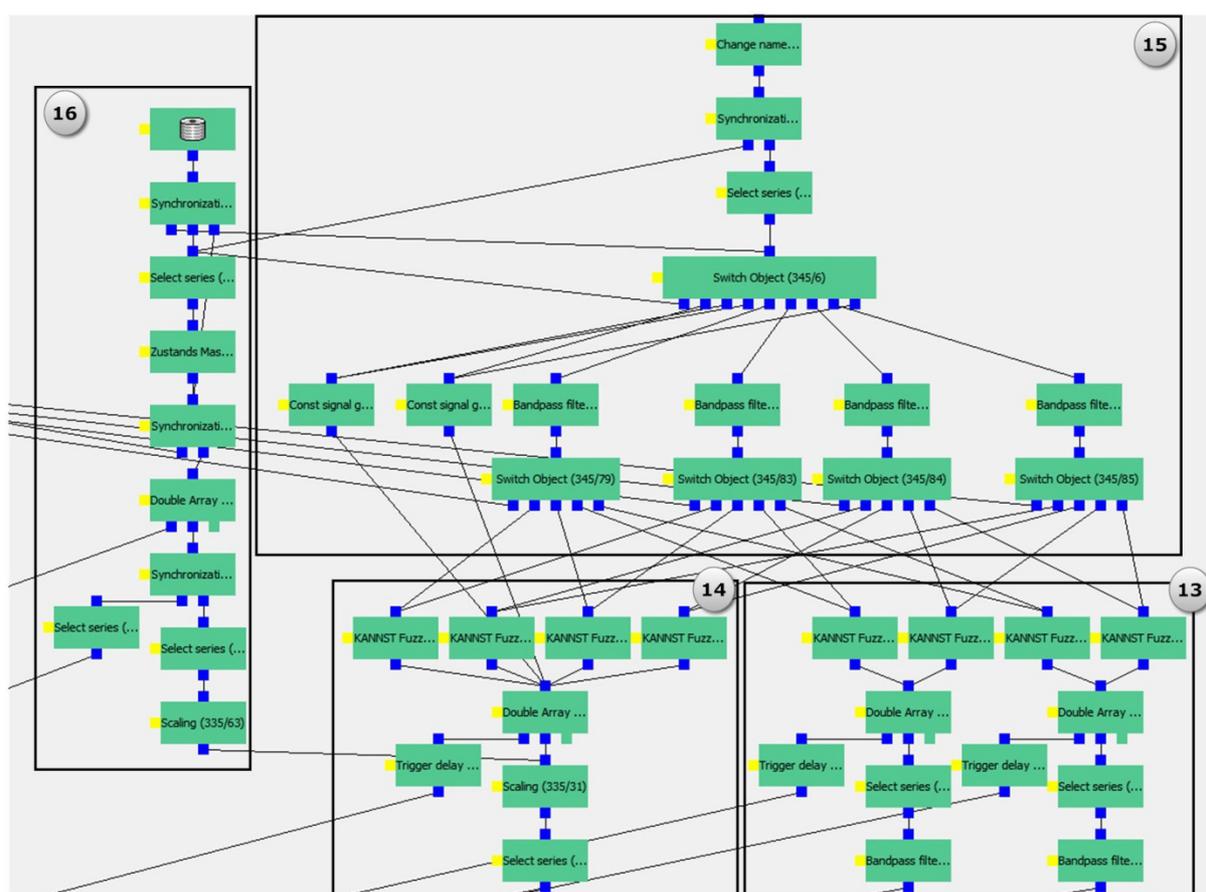


Abbildung 161: Berechnung Qd Waldbröler Strang

**Abschnitt 13:** In diesem Abschnitt befinden sich die Fuzzyregler für die Konzentrations- und die Frachtregelung. Als Eingangsgrößen der Fuzzyregler werden die im Abschnitt 2 berechneten Beckenfrachten und Beckenkonzentrationen verwendet.

**Abschnitt 14:** Dieser Abschnitt beinhaltet die Fuzzyregler für die Sommer-, bzw. Winterregelung. Die Eingangsgrößen der Fuzzyregler sind die Beckenfüllstände die entsprechend dem Eingangsbereich der Fuzzyregler skaliert werden.

**Abschnitt 15:** In Abschnitt 15 werden die entsprechenden Beckenstellwerte weitergeleitet. Die Switch Module hinter den Fuzzyreglern schalten zwischen den Sommer-, Winter-, Fracht-

oder Konzentrations-Fuzzyreglern um. Die Schaltinformation wird zuvor in Abschnitt 9 für den Strang Waldbröl bestimmt. Im Anschluss daran erfolgt eine Grenzwertüberwachung. Mittels eines abschließenden Switchmoduls werden – entsprechend dem in Abschnitt 16 bestimmten Zustand – die Beckensollwerte geschaltet.

**Abschnitt 16:** Der Belastungszustand des Kanalnetzstranges Waldbröl wird in diesem Abschnitt bestimmt. Die benötigten Messwerte werden zunächst für die StateMachine ausgewählt und entsprechend skaliert. Anschließend wird der Zustand bestimmt und an das Switch Modul weitergeleitet. Alle Daten der StateMachine werden in der Datenbank gespeichert.

### 12.4.7 Stellwertausgabe

Die folgende Abbildung zeigt die Übergabe der Stellwerte an die lokale Steuerung.

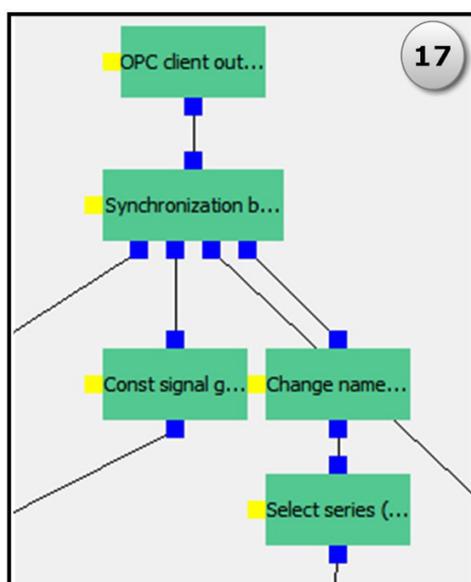


Abbildung 162: Stellwertausgabe

**Abschnitt 17:** In diesem Abschnitt laufen alle vorher bestimmten Drosselstellwerte zusammen. Sie werden synchronisiert und anschließend über das OPC Output Modul in die lokale Steuerung geschrieben.

## 12.5 Technische Sicherheitsmaßnahme

Die Steuerungssoftware ist in der Regel räumlich von dem RÜB und der dort vorhandenen lokalen Steuerung getrennt. Zur Überprüfung der Kommunikation oder eines Ausfalls von lokaler Steuerung (RÜB Seite) und Regelungssoftware (Leitsystemseite) wird ein Checktakt - auch Lifebit genannt - ausgetauscht. Das Item des Checktaktes liegt hierbei auf einem SPS-System, auf den beide Seiten lesend und schreibend zugreifen können (Regelungssoftware über OPC). Im folgenden Beispiel (Abbildung 163) sind die beiden räumlich getrennten Teilsysteme dargestellt, die gemeinsam auf einen Wert in einem OPC Server zugreifen. Beide prüfen in zyklischen Abständen den Checktakt. Die SPS erwartet, dass der Checktakt von der Steuerungssoftware auf 1 gesetzt wird und setzt ihn anschließend auf 0. Wurde der Checktakt von der Steuerungssoftware nach einer definierten Reaktionszeit nicht auf 1 gesetzt, bedeutet dies entweder einen Ausfall der Steuerungssoftware oder der Kommunikation. Ist dies der Fall, schaltet das System in einen Fehlerzustand mit unregelmäßigem Kanalnetz.

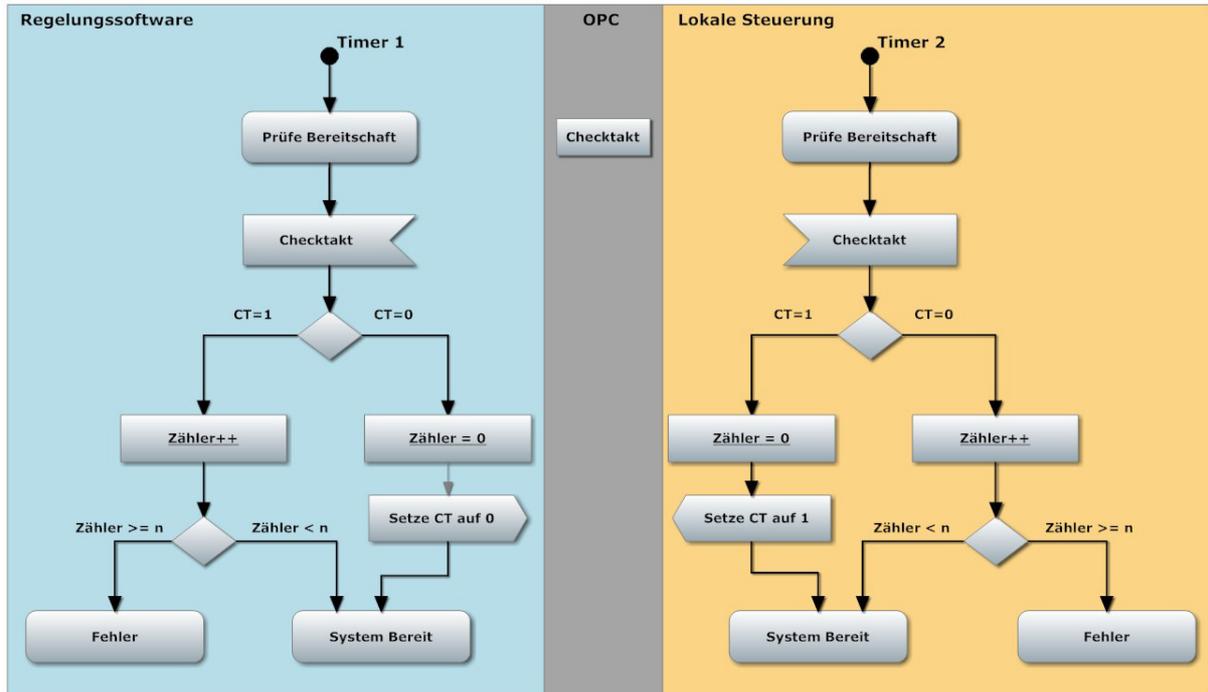
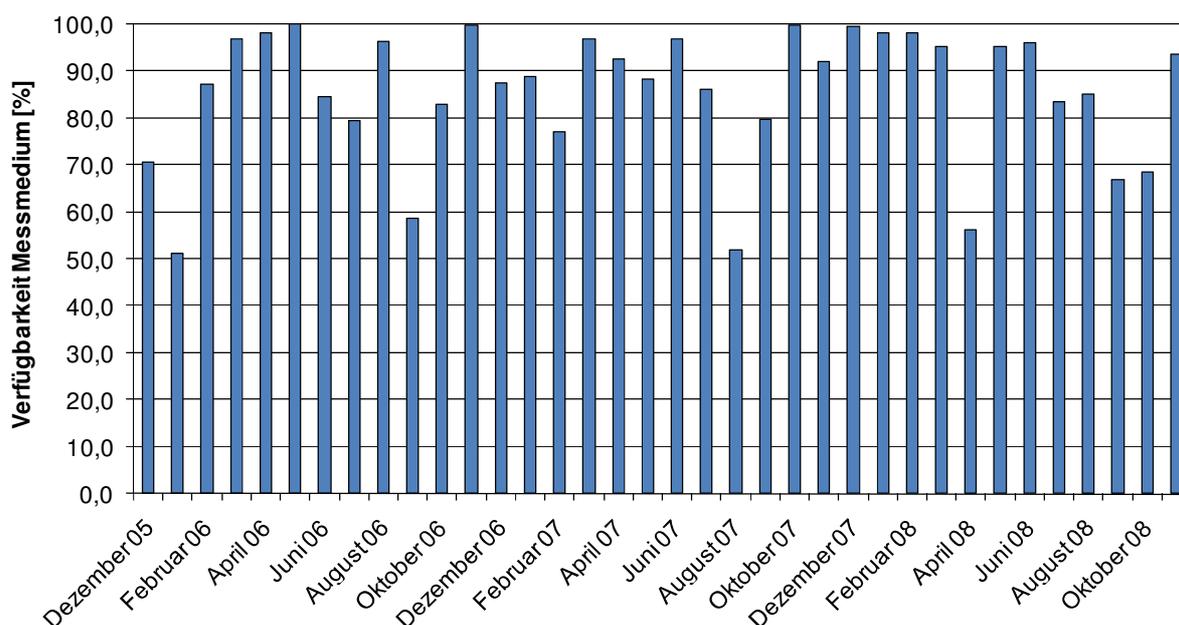


Abbildung 163: Checktakt

## 13 Verfügbarkeit des Messmediums

In der Entwicklungsphase werden das Messgerinne sowie die Zu- und Abführung des Schmutzwassers im Bypass permanent auf Verfügbarkeit überprüft. Für die Verfügbarkeit des Abwassers (Messmediums) im Gerinne wird stellvertretend das RÜB Talstraße während der Bestandsaufnahme im Jahr 2005/2006 betrachtet, da der Container an diesem Standort als erstes in Betrieb genommen wurde (weitere Auswertungen befinden sich im Anhang 02).

**Zuverlässigkeit des Bypass-Messsystems an einem RÜB**



**Abbildung 164: Verlauf der Verfügbarkeit des Messmediums**

In Abbildung 164 ist prozentual die Zeit der Verfügbarkeit aufgetragen, d.h. die Zeit, zu der das Messmedium im Gerinne den Online-Messungen zur Verfügung steht. Daraus geht eine durchschnittliche Verfügbarkeit von 85 % hervor. Allerdings sind auch zwischenzeitlich Verschlechterungen zu erkennen. Diese sind auf Umbauten zurückzuführen, bei denen die Bypass-Apparatur angepasst und verändert wird.

Zu Beginn der Auswertungen im Dezember 2005 und Januar 2006 liegen noch Konstruktionsmängel vor. Diese lassen nur eine Verfügbarkeit des Messmediums im Schnitt von unter 70 % zu. Durch eine Veränderung der Pumpeneinbaulage im Kanal und ein geändertes Steuerprogramm für die Pumpenhäufigkeit und -geschwindigkeit kann die Verfügbarkeit in den darauf folgenden Monaten auf über 90% gesteigert werden (März bis Mai 2006). In den Monaten Juni, Juli und September, in denen sehr wenig Niederschlag fällt, ist im Durchschnitt weniger Abwasser im Kanal als im Frühjahr. Dies hat einen höheren Wartungsaufwand für die Pumpe zur Folge und beeinträchtigt die Pumpenleistung, da die Feststoffkonzentration im Abwasser stark zunimmt, wodurch die Verfügbarkeit des Pumpensystems abnimmt. Den Störungen in den Sommermonaten kann durch erhöhten Wartungsaufwand (1-mal wöchentlich) entgegengewirkt werden. Die Monate August (außergewöhnlich hoher Niederschlag) und Oktober bis Dezember bestätigen die Tendenz, dass bei größeren Abwassermengen im

Kanal – durch höhere Niederschläge – die Störanfälligkeit und Wartungsintensität der Pumpe abnimmt und die Verfügbarkeit der Pumpen und des Messmediums zunimmt. Im Oktober wird die Schneidwerkspumpe durch eine Freistromradpumpe ersetzt. Die Ablagerungen in dem Gerinne können durch diese Maßnahme stark verringert werden. Durch die Austauscharbeiten fällt die Verfügbarkeit kurzfristig auf 83 % ab. Sie steigt aufgrund der verbesserten Pumpvorrichtung dann aber wieder auf 99 % im November an.

Eine hohe Verfügbarkeit des Messmediums ist eine Grundvoraussetzung für plausible und kontinuierliche Messergebnisse. Der Bypass mit Messgerinne erweist sich im KANNST Projekt als eine sehr praktikable Lösung.

### **Verfügbarkeit der Ablaufpumpe**

Um Ablauf und Entlastung zu beproben, wird Messmedium (Abwasser bzw. Mischwasser) in die dafür vorgesehenen Messgerinne gepumpt. Darin befinden sich die Sensoren zur Untersuchung qualitativer Abwasserparameter. Aus dem Messgerinne läuft das Abwasser über Freispiegelleitungen wieder in den Kanal bzw. in das Becken zurück.



**Abbildung 165: Messgerinne**

Fallen die Pumpen aus, so werden die Gerinne nicht durchströmt, der automatische Probennehmer kann seine Arbeit nicht ordnungsgemäß verrichten und die Onlinemessungen liefern keine aktuellen Messwerte mehr.

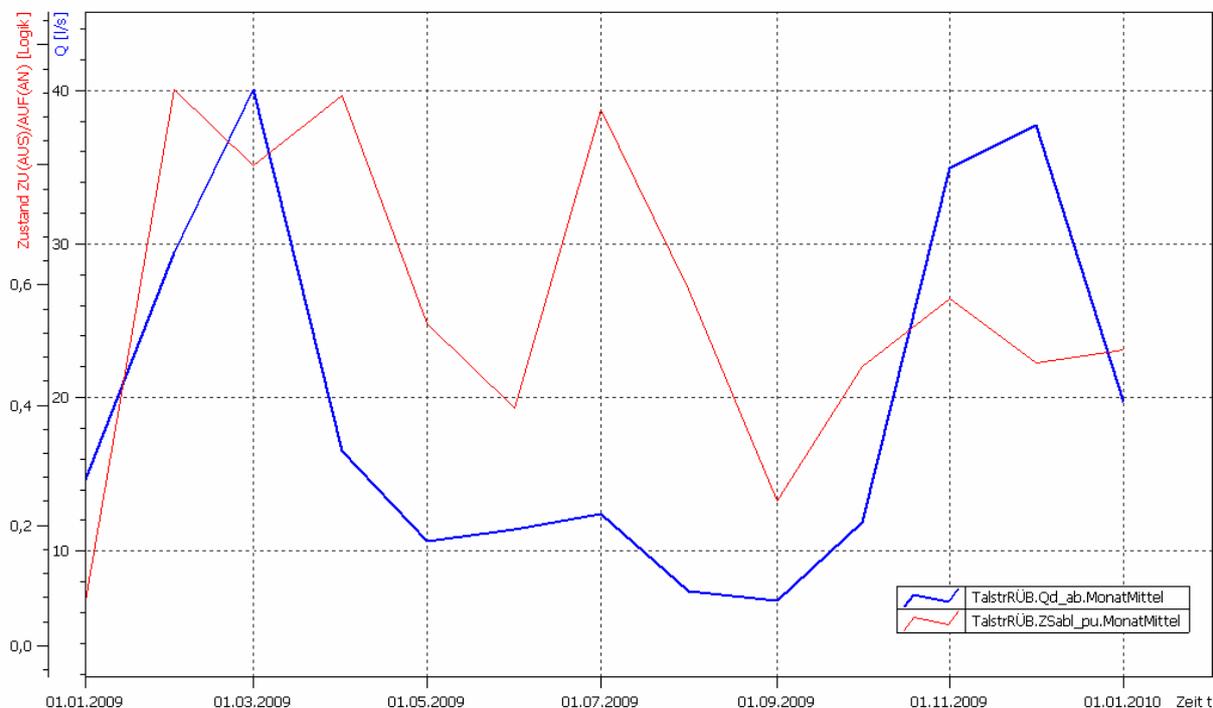
Es werden bei laufenden Messkampagnen und während den Bestandsaufnahmen hohe Verfügbarkeitsraten angestrebt, um derart kritische Umstände zu vermeiden. Insbesondere bei der Regelung nach Onlinemessungen (Reglerstufe 3) ist eine hohe Messmediumverfügbarkeit unverzichtbar.

Die Verfügbarkeit des Messmediums wird von mehreren Faktoren beeinflusst:

- verwendete Hardware (z.B. Bauart der Pumpen)
- bauliche Gegebenheiten
- Wetter bzw. Jahreszeit
- Personaleinsatz

Auf der nachfolgenden Grafik ist der Zusammenhang zwischen der zur Kläranlage geleiteten Wassermenge im Kanal und der Pumpenverfügbarkeit zu erkennen. Die blaue Kurve gibt Monatsmittelwerte der Drosselwassermenge wieder. In den Monaten August und September sind diese Werte aufgrund des ausgebliebenen Niederschlags erwartungsgemäß niedrig. Bei wenig Wasser im Kanal ist der Anteil von Grobstoffen höher, die Pumpen verschmutzen schneller und neigen dazu, häufiger auszufallen. Zur typischen Urlaubszeit steht üblicherweise auch weniger Personal zur Störungsbeseitigung zur Verfügung. Der rote Verlauf zeigt die monatliche Verfügbarkeit der Ablaufpumpe am RÜB

Talstraße im Jahr 2009. Ein Verfügbarkeitsfaktor von 0,5 im Mai z.B. bedeutet, dass die Ablaufpumpe nur die Hälfte der Zeit im Monat Mai gelaufen ist.



**Abbildung 166: Verfügbarkeit der Ablaufpumpe u. Wassermengen im Kanal am RÜB Talstraße 2009, Monatsmittelwerte**

Es besteht ebenfalls eine Verbindung zwischen der Verfügbarkeit und den baulichen Gegebenheiten. Muss das Medium weite Wege bis zum Gerinne zurücklegen oder werden große Höhenunterschiede überwunden, so wirkt sich das ungünstig auf die Verfügbarkeit aus.

Weil in diesen Fällen keine Freistromrad-Pumpen eingesetzt werden (s. Kapitel Pumpentechnik) können, kommen hier die bauartbedingt störungsanfälligeren Schneidwerkumpen zum Einsatz:

- Lange Förderwege (60 Meter) beim RÜB Sängerheim
- Am RÜB Eckenbach liegt die Pumpe etwa 9 Meter tiefer als das Gerinne

Die nachstehenden Diagramme verdeutlichen die Auswirkungen der baulichen Gegebenheiten auf die Verfügbarkeit des Messmediums. Vergleichsweise günstigere Umstände wie z.B. bei den RÜB Talstraße und Hast führen zu längeren störungsfreien Zeitabschnitten. Für die Diagramme werden Daten aus dem Zeitraum vom 2007 bis Anfang 2011 herangezogen. Bei der Auswertung der Verfügbarkeit „RÜB Eckenbach“ ist der untersuchte Zeitraum ausnahmsweise kürzer (01.01.2007 - 23.04.2009), weil die dortige Ablaufpumpe wegen unverhältnismäßig hohem Wartungsaufwand nicht länger betrieben wird.

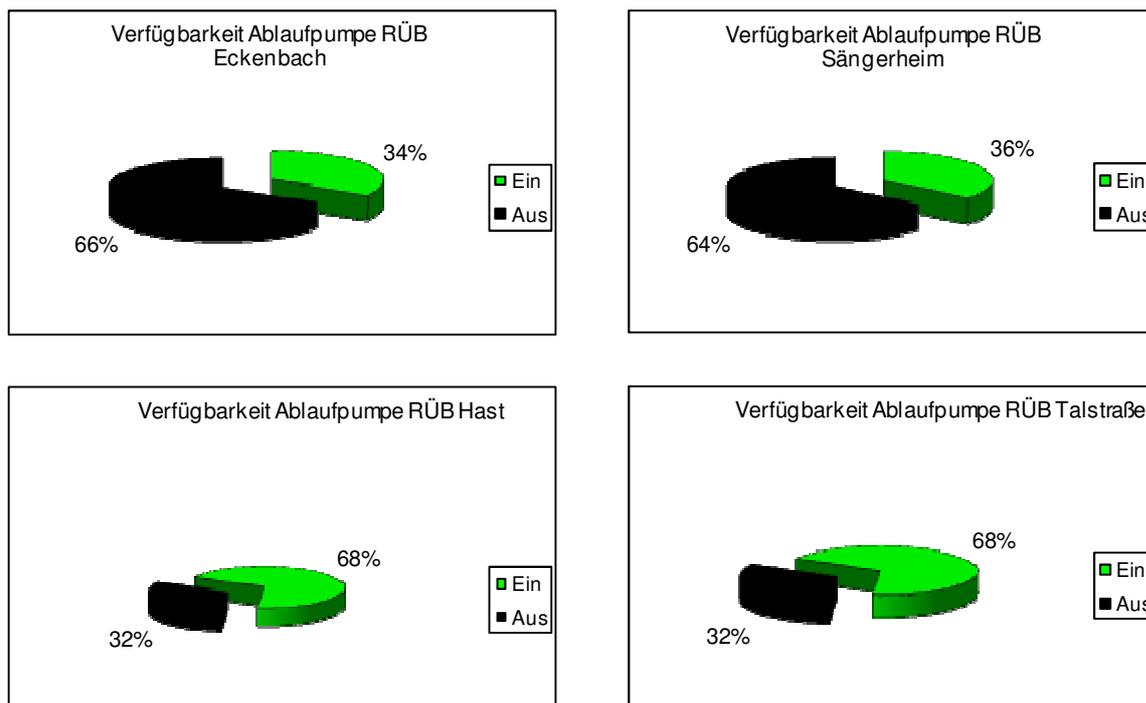


Abbildung 167: Verfügbarkeit Ablaufpumpen KANNST-RÜB 2007-2011

Als Messmedium fungiert nicht nur Abwasser aus dem Ablauf zur Kläranlage, sondern es wird auch Mischwasser aus dem Bereich des Klärüberlaufs in ein separates Gerinne gepumpt. Hierbei liegt die Pumpenverfügbarkeit nahezu bei 100 Prozent. Zum einen wird das Abwasser im Entlastungsfall durch Regenwasser stark verdünnt und zum anderen setzen sich Inhaltsstoffe bei Durchströmen des RÜB ab. Beides führt zu wesentlich weniger Grobstoffen, die der Entlastungspumpe Schwierigkeiten bereiten könnten.

Beim RÜB Talstraße beträgt die Entlastungsdauer von 2007 bis Ende 2010 ungefähr 155 Tage. Die Entlastungspumpe läuft davon etwa 125 Tage. Daraus ergibt sich eine rechnerische Messmedium-Verfügbarkeit von über 80 Prozent. Weil die Pumpen bei Entlastungsereignissen aus Sicherheitsgründen mit Verzögerung anlaufen und außerdem eine Mindestentlastungswassermenge Voraussetzung ist, kommt es zu einer tatsächlichen Verfügbarkeit nahe 100 Prozent. Pumpenausfälle z.B. durch Verschmutzung werden nicht festgestellt.

## 14 Messstationen Gewässer

Das oberste Ziel im Projekt KANNST ist in einem ersten Schritt der Schutz des Gewässers durch die optimale Ausnutzung des zur Verfügung stehenden Stauraumvolumens der Regenüberlaufbecken. Der zweite Schritt geht über die rein hydraulische Sichtweise hinaus und berücksichtigt die Konzentrationen die in den entlasteten Wassermengen auftreten. In diesem speziellen Fall wird die Regelung noch weiter differenziert und je nach Jahreszeit mit dem Schwerpunkt der Fracht-, bzw. der Konzentrationsreduzierung betrieben.



Als Besonderheit gilt im KANNST-Projekt, dass das entlastete Wasser des ausgewählten Netzes in den Bierenbach und den Ölsbach, beides Bäche die zum Einzugsgebiet der Bröl gehören, geleitet wird. Dort ist die nachhaltige Wiederansiedlung des atlantischen Lachses (Abbildung 168) angestrebt. Das Erreichen dieses Zieles wird unterstützt, in dem durch die integrierte Steuerung die Verschmutzung der Bäche durch die reduzierten Einträge aus der KA und dem Kanalnetz möglichst gering gehalten werden soll. Um die Immissionen von verschiedenen Schadstoffen im Gewässer beurteilen zu können werden Online-Messungen am Bierenbach zur Kontrolle installiert.

**Abbildung 168: Lachs im Gewässer [Bröl-NRW 2006]**

Für diese Betrachtung des Gewässers existieren aus dem Bröl Projekt „Bröl – Phase III: Umsetzung des Sanierungskonzeptes für Salmoniden-Laichgewässer“ [BRÖL-NRW 2006<sup>55</sup>] zwei Gewässer-Messcontainer inklusive Analysegeräte. Diese Container (Abbildung 169) ermöglichen die Erfassung der Konzentrationen im Gewässer und werden im weiteren Projektverlauf die Auswirkungen der Entlastungen auf dieses festhalten, während die Abflusssteuerung zum Einsatz kommt.

Zur Dokumentation und Kontrolle des Bierenbacher-Baches werden diese Messcontainer (Abbildung 170) im Einzugsgebiet der KA Homburg-Bröl am Bachlauf aufgestellt. Diese Container unterscheiden sich von den Abwasser-Containern an den RÜB. Sie werden speziell für die Anforderungen, die ein offener Bachlauf mit



**Abbildung 169: Gewässercontainer**

<sup>55</sup> Leitfaden zur wasserwirtschaftlich-ökologischen Sanierung von Salmonidenlaichgewässern in NRW. Projekt-IS/Bröl-NRW; Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MUNLV). ISBN-Nr.: 3-9810063-6-4

sich bringt, entwickelt. Mit dem entsprechenden Messequipment ausgerüstet lassen sich die benötigten Parameter des Gewässers erfassen.

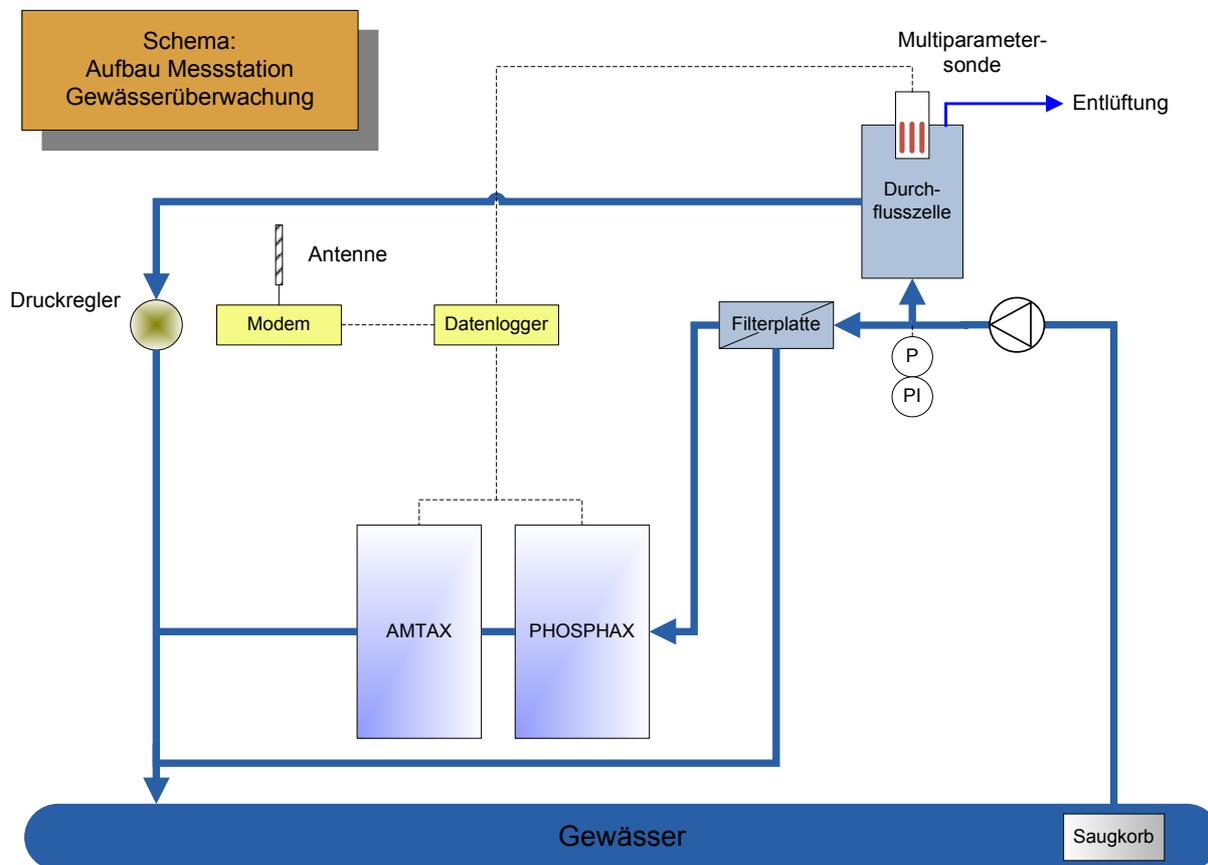


Abbildung 170: Schematischer Aufbau der Gewässerüberwachung

Gemessen werden im Gewässer-Container:

- Ammoniumstickstoff ( $\text{NH}_4\text{-N}$ )
- Sauerstoffgehalt ( $\text{O}_2$ )
- pH-Wert
- Temperatur
- Leitfähigkeit
- Trübung
- Phosphat

Anmerkung: Anhand des Kurvenverlaufes für die Leitfähigkeit kann auf einfache Art festgestellt werden, ob im Betrachtungszeitraum auswertbare Datensätze vorliegen. Diese Hilfsgröße erleichtert in der umgesetzten Konfiguration des „Gewässercontainers“ die Beurteilung des Entnahme- und Analytiksystems.

## 14.1 Containeraufbau und Inbetriebnahme

Über einen Zeitraum von sechs Monaten wird die Auswirkung der Entlastung des RÜB Hast auf den Bach untersucht. Ein Gewässercontainer wird dafür oberhalb des Regenüberlaufbeckens Hast

(Abbildung 171: Punkt **2**) aufgestellt und installiert, ein weiterer zwischen RÜB Hast und RÜB Talstraße (Abbildung 171: Punkt **1**). Da die Becken Hast und Talstraße sehr nahe beieinander liegen, werden die Messpunkte „nach RÜB Hast“ und „vor RÜB Talstraße“ zu einer Position **1** zusammengefasst und als Messort vor Einleitung RÜB Talstraße bzw. nach Einleitung RÜB Hast gewertet.

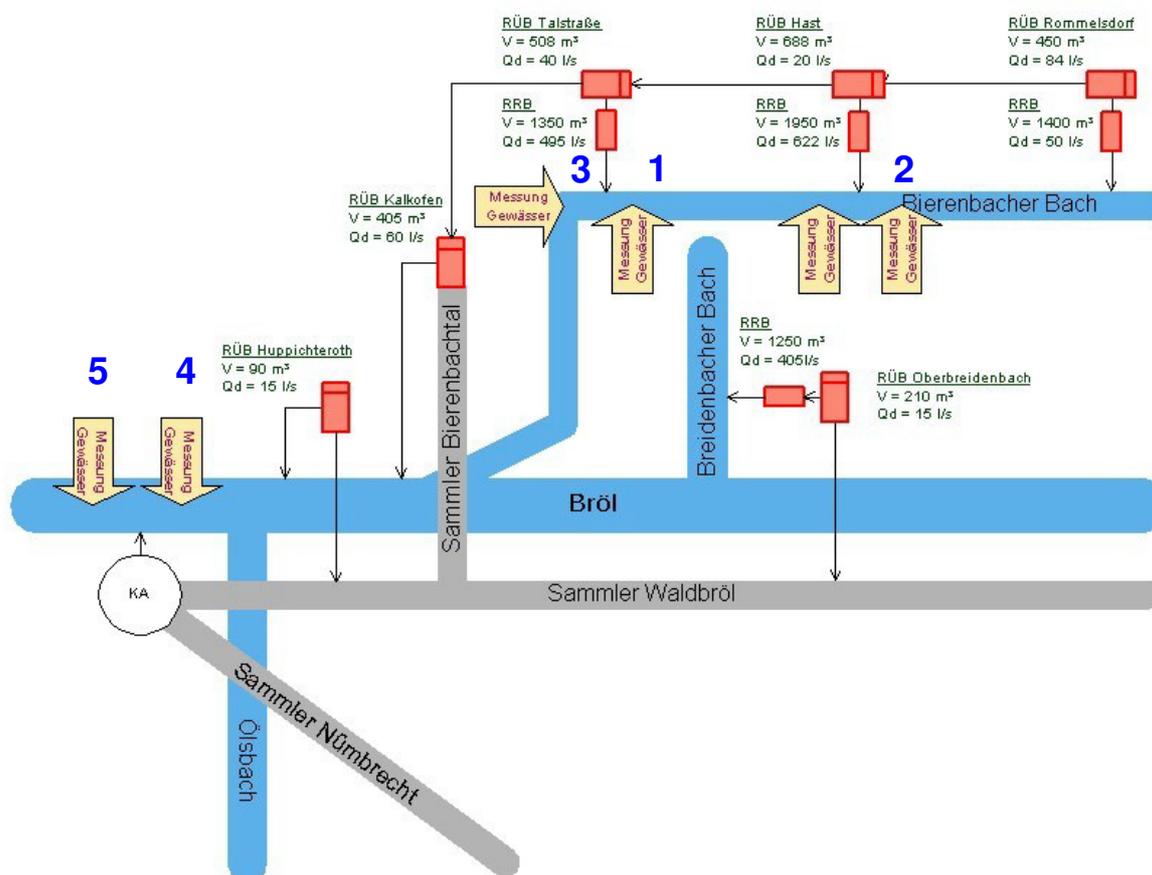


Abbildung 171: Aufstellungsorte der Gewässer-Container

Nach Abschluss des ersten Messzeitraums von sechs Monaten wird der Container von Position **2** nach **3** umgestellt. Dann erfolgt die Messung vor und nach der Einleitungsstelle des RÜB Talstraße für weitere sechs Monate. Die Aufstellung der Messcontainer für das Gewässer an den Positionen **4** und **5**, jeweils vor und hinter der Einleitungsstelle der Kläranlage Homburg-Bröl, wird im KANNST-Projekt nicht mehr umgesetzt.

## 14.2 Auswertung Gewässer-Container

Die Erprobungsphase der Gewässer-Container im Einsatz für KANNST beginnt Anfang 2007. An den zwei Messorten der Gewässer-Container ist der Bachlauf des Bierenbachs schmal und er ist von wechselnden und zum Teil sehr niedrigen Wasserständen geprägt (Abbildung 172). Aus diesem Grund werden die Sonden nicht direkt im Gewässer positioniert, da der Bachlauf häufig über keine ausreichende Wassertiefe verfügt und die Geräte im Bachbett sehr schnell trocken fallen können. Um dieser Problematik zu entgehen, wird das Messmedium mit Pumpen die im Container aufgestellt sind, über einen Saugkorb (Grobfilter, Abbildung 172) angesaugt und an einer Duchflusszelle mit

eingebauter Multiparametersonde vorbeigeführt. Über einen Bypass wird das gleiche Medium auf einen Membranfilter gegeben. Von dort können die beiden Analyseeinheiten die benötigten Probenwassermengen ziehen.

Nach Aufstellung der Messcontainer am Bierenbach, vor und hinter dem RÜB Hast, ergeben sich anfänglich Schwierigkeiten mit dem Betrieb der Messstationen. Besonders wenn bei Regenereignissen das Wasser mit Feststoffen befrachtet ist (im Sommer häufig Grasschnitt, im Herbst durch Laub, Äste u.a.), kommt es immer wieder zu Ausfällen der Einrichtungen. Der Saugkorb vor der Pumpe verlegt sich sehr schnell und die Standzeit der nachgeschalteten Filterplatte reduziert sich durch die mitgeführten Schwebestoffe drastisch. Mit einer Drucksonde nach der Probeentnahmepumpe können zwei Störungen detektiert werden, die zur Abschaltung der Anlage führen.



Abbildung 172: Saugkorb im Bachlauf der Bröl

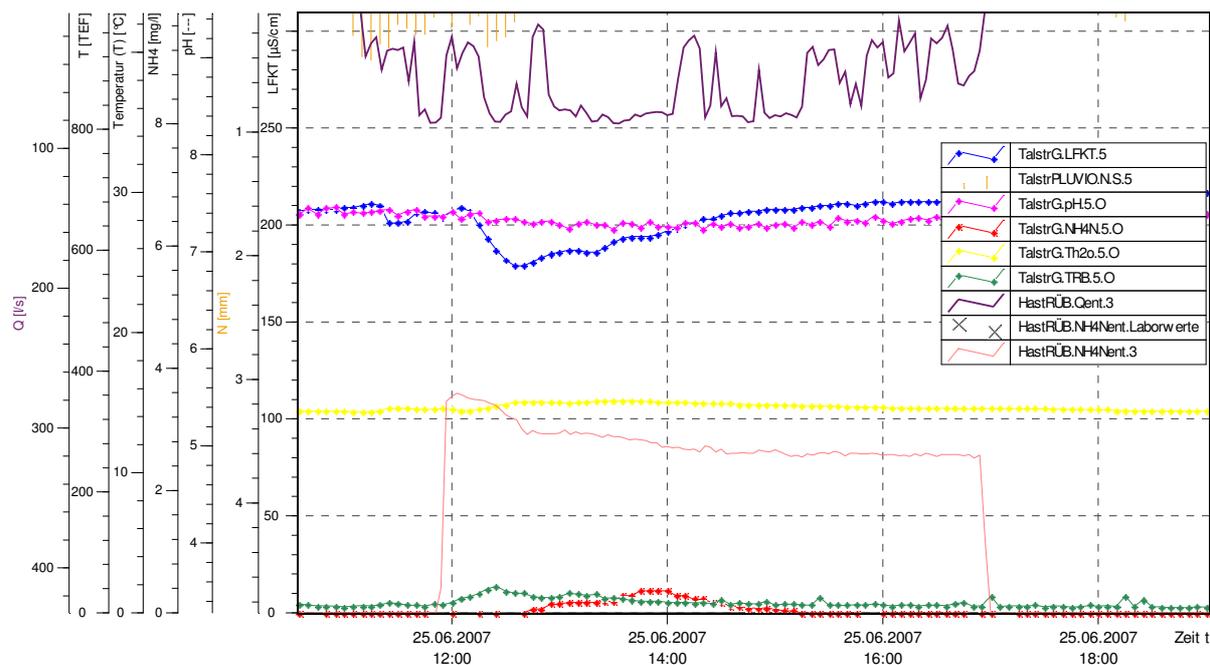
- Unterschreiten MIN-Druck: Saugkorb verlegt, Ansaugleitung defekt o.ä.
- Überschreiten MAX-Druck: Filterplatte verlegt

Die Optimierung der Probenentnahmevorrichtung (Pumpe) ist ein laufender Prozess. Ausfälle bei einsetzendem Starkregen können jedoch nicht ausgeschlossen werden. Im Rahmen des KANNST-Projektes wird auf eine weitere Optimierung verzichtet. Dies wäre eine Aufgabe für ein Folgeprojekt.

In einem betrachteten Messzeitraum von April bis Juli 2007 erfolgen zwölf Entlastungsereignisse im Kanalnetz. Allerdings können hiervon nur vier Ereignisse zuverlässig mit der Messtechnik im Gewässer-Container erfasst werden. Diese vier korrekt erfassten Ereignisse gehen in die weitere Betrachtung des Gewässers zum Zeitpunkt einer Entlastung ein. Anhand dieser Messungen wird erfasst, wie viele Schmutzstoffe bei der Entlastung aus dem Kanalnetz über das RÜB in das Gewässer gelangen und wie sehr sie den Bach belasten.

Mit zu den wichtigsten Parametern, im Hinblick auf ihre Auswirkungen auf die Gewässerbiozönose, gehört bei einer Mischwasserentlastung aus dem Kanal in ein Gewässer neben AFS das Ammonium bzw. die Begünstigung der Ammoniakbildung.

Stellvertretend für die vier verwertbaren Messzeiträume sind in Abbildung 173 Zeitreihen der Gewässer-Container und Daten vom Messcontainer am RÜB Hast im Kanalnetz dargestellt. Es ist im Zeitraum der Entlastung am RÜB eine  $\text{NH}_4\text{-N}$  Konzentration (rote Linie, „HastRÜB  $\text{NH}_4\text{Nent}$ “ in Abbildung 173) von max. 3,5 mg/l im Abschlag zu verzeichnen. Im Gewässer ist nach dem Entlastungsereignis ein leichter Anstieg der Konzentrationen bis 0,4 mg/l festzustellen (rote, gekreuzte Linie, „TalstrG  $\text{NH}_4\text{N}$ “).



**Abbildung 173: Messdaten aus dem Gewässercontainer und dem Messcontainer RÜB Hast bei einem Entlastungsereignis am 25.06.2007**

Die Daten aus dem Gewässercontainer sind in der vorgestellten Grafik mit „TalstrG“ gekennzeichnet und die Messungen aus dem Kanalnetz am Abschlag RÜB mit „HastRÜB“. Der gefallene Niederschlag im Zeitraum der Entlastung („HastRÜB Qent“) wird mit „TalstrPLUVIO“ bezeichnet.

Im gesamten Zeitraum vom April bis Juli 2007 können im Abschlag Ammoniumstickstoffkonzentrationen in einem Bereich von 0,95 bis 6,78 mg/l  $\text{NH}_4\text{-N}$  gemessen werden. Im Gewässer werden in den vier zur Verfügung stehenden Messungen, während und nach den Abschlägen,  $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentrationen von 0,03 bis 1,64 mg/l und pH-Werte bis 7,6 gemessen.

An dem Ereignis vom 25.06. kann für die Bewertung einer möglichen Bildung von Ammoniak im Gewässer eine  $\text{NH}_4\text{-N}$  Konzentration von 0,4 mg/l, eine Temperatur von 15°C (gelbe Linie, „TalstrG.Th2o“) und ein pH-Wert von 7,4 (rosa Linie, „TalstrG.pH“) aufgezeichnet werden. Das Verhältnis von Ammonium zu Ammoniak ist pH-Wert und Temperatur abhängig. Nach vorliegenden Messdaten liegt das Verhältnis von Ammonium zu Ammoniak bei ca. 99:1. Nur ein Prozent des Ammoniums kann sich bei diesen Bedingungen zu Ammoniak wandeln, was bei einer  $\text{NH}_4\text{-N}$  Konzentration von 0,4 mg/l unschädlich ist. Bei diesen festgehaltenen Ereignissen scheint der Bachlauf damit nicht durch die Bildung von Ammoniak gefährdet zu sein. Eine Gesamtaussage kann allerdings nicht pauschal getroffen und Gefährdungen können nicht ausgeschlossen werden, da sich die Bedingungen durch Immisionen und jahresabhängige Temperaturschwankungen ändern können.

Es kann jedoch festgehalten werden, dass eine Zeitspanne von ca. einer Stunde zwischen dem Beginn des Entlastungsereignisses am RÜB und einer darauf folgenden Reaktion im Gewässer vergeht. So ist nach einer Stunde ein leichter Anstieg der  $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentration im Gewässer zu verzeichnen. Die Einleitung des RÜB erfolgt nicht direkt in den Bach. Bei den RÜB Hast, Talstraße und Rommelsdorf im Strang Waldbröl wird die Entlastung über ein Regenrückhaltebecken (RRB) geleitet, wodurch die Auswirkungen der Entlastung verzögert werden.

Im gesamten Messzeitraum wird kontinuierlich versucht, die Häufigkeit der Messwertausfälle, die sich aufgrund des sehr kleinen Gewässers ergeben, zu minimieren. Die Zuverlässigkeit der Messungen in den Gewässercontainern kann aber nicht auf ein zufriedenstellendes Niveau angehoben werden. Es bleibt daher festzuhalten, dass sich ein Betrieb von Messstationen an derart kleinen und abflussarmen Gewässern wie dem Bierenbach als nicht praktikabel darstellt. Allerdings kann etwas unterhalb dieser Messstandorte mit dieser Technik an etwas größeren Bachläufen im Rahmen des Brölprojekts erfolgreich gemessen werden.

## 15 Kameraeinsatz

Während des Forschungsprojektes wird der Einsatz von Kameras im Umfeld der RÜB getestet. Neben der Beobachtung kritischer Betriebszustände und der Bewertung von Einbauten ist es auch das Ziel, mit Bildern und Videos der Abwasserbehandlungsanlagen die Aufmerksamkeit interessierter Bürger zu wecken, Präsentationen zu untermauern sowie die Öffentlichkeitsarbeit zu verbessern. Außerdem soll untersucht werden, inwieweit sich die aktuelle Kameratechnik zu einer Fernüberwachung von RÜB und Kanälen eignet. An zwei Betriebspunkten des geregelten Kanalnetzes werden Spezial-Kameras montiert:

- RÜB Talstraße im Entlastungskanal. Hier sollen wegen einer vermuteten Rückstauproblematik aus dem nachgeschalteten Regenrückhaltebecken die hydraulischen Verhältnisse im Entlastungskanal untersucht werden.
- RÜB Kalkofen am Trennbauwerk zur Beobachtung von Beckenzulauf und der Ammonium-Messung im Kanal.

In diesem Kapitel wird zunächst auf die eingesetzte Technik eingegangen. Danach wird getrennt nach Einsatzort auf die Details und Besonderheiten des jeweiligen Kameraeinsatzes eingegangen.

### 15.1 Kameratechnik

Im Kanalnetz können unter Umständen explosionsfähige Gasgemische auftreten. Daher müssen Kameras und Beleuchtung in explosionsgeschützter Ausführung betrieben werden. Diese Bauformen sind aufwendiger in ihrer Konstruktion und teurer als entsprechende Standardversionen. Die Kameras sollen für den Betrieb in Abwasseranlagen so robust sein, dass sie in seltenen Ausnahmefällen auch mal überflutet werden können. Ex-Schutz und Tauchfähigkeit sind hier leider schwer zu kombinieren. Um den Ex-Schutz zu gewährleisten, werden die Kameras in ein speziell gekapseltes Gehäuse eingebaut. Zündet ein Gemisch im Inneren des Kameragehäuses, so wird der dabei entstehende Druck kontrolliert nach außen geleitet. Eine Zündung der potentiell explosiblen Umgebungsluft erfolgt nicht (Durchschlagssicherheit). Demnach muss Druck von innen entweichen können, zugleich darf aber kein Wasser von außen eindringen wenn die Kamera getaucht betrieben wird. Bei der eingesetzten Kamera wird ein Kompromiss gefunden: Vollwertiger Ex-Schutz bei größtmöglicher Wasserfestigkeit.

- Laut Datenblatt ist die Lösung mit dem verwendeten druckfest gekapselten Gehäuse zugelassen in explosionsgefährdeten Bereichen der Zone 1 u. 2 (Gas) und Zone 21 u. 22 (Staub). Certification Number: Kema 08 ATEX 0123 S/N 3321148-10-08
- Schutzart IP 66: Zweite Kennziffer (X6) Schutzgrad gegen Wasser: Geschützt gegen starkes Strahlwasser. Definition: Wasser, das aus jeder Richtung als starker Strahl gegen das Gehäuse gerichtet ist, darf keine schädlichen Wirkungen haben.

In der Praxis zeigt sich, dass die Wasserfestigkeit besser ist als vom Hersteller garantiert. Ein kurzzeitiger Betrieb unterhalb der Wasserlinie verursacht keinerlei Probleme.

Die Kameras mit Gehäuse werden mit einer Edelstahl-Wandhalterung geliefert, welche horizontales und vertikales Schwenken erlaubt (jeweils  $\pm 90^\circ$ ). Somit besteht die Möglichkeit das Kamerasichtfeld für jeden Einsatzort optimal zu justieren.

**Tabelle 15: Technische Daten der Kamera**

<b>Kameratyp</b>	Mobotix Typ D22M-Secure
<b>Optik</b>	Objektiv 43 mm Weitwinkel (Äquival. Kleinbild-Brennweite), 45° Blickwinkel (horizontal)
<b>Auflösung</b>	1280 x 960 Bildpunkte, farbig, 1 Lux, JPEG-Format
<b>Sensoren</b>	Bewegungserkennung (Video-Motion)
<b>Schnittstelle</b>	10/100BaseT-Ethernet
<b>Speicher</b>	64 Mbyte interner Bildspeicher
<b>Spannungsversorgung</b>	PoE oder Netzteil

Weil es im Entlastungskanal am RÜB Talstraße absolut dunkel ist und am RÜB Kalkofen nur etwas Tageslicht durch einen Gitterrost dringt, muss für brauchbare Aufnahmen auch an geeignete Beleuchtung gedacht werden. Zum Einsatz kommen Spezial-Leuchten vom Typ „HydroLight-Ex“ mit folgenden Eigenschaften:

- 2 x 58 Watt Leuchtstofflampen mit elektronischem Vorschaltgerät
- Zulassung für EX-Schutz-Zone 1 u. 2
- IP 68 (Schutz gegen dauerndes Untertauchen)
- Schutzrohr aus 4 mm starkem Polycarbonat, schlagfeste Ausführung mit zusätzlicher Sicherheit gegen mechanische Stoßeinwirkung (z.B. Treibgut)

Die Datenaufzeichnung erfolgt mittels Laptop am RÜB Talstrasse. Damit kann man vor Ort die aktuellen Kameraaufnahmen einsehen und ggf. noch Parameter (z.B. Helligkeit) nachjustieren. Die Festplatte des Laptop (etwa 100 GB frei) reicht aus, um hochauflösende, sekundlich aufgenommene Kamerabilder über einen Zeitraum von ca. 14 Tagen zu speichern.

Beim RÜB Kalkofen werden die Bilder mittels NAS (Network Attached Storage) gespeichert. Dieses Gerät enthält zwar keinen Bildschirm zu Kontrollzwecken, bietet dafür neben umfangreichem Speicherplatz (1 TB) noch nützliche Zusatzfunktionen wie z.B. eine Fernwartung über Internetbrowser.

## 15.2 Kamera am RÜB Talstraße

Bei einer Plausibilitätsprüfung der Entlastungswassermengenmessung am RÜB Talstraße fallen Messwerte auf, die bei Starkregenereignissen durch Rückstau aus dem nachgeschalteten Regenrückhaltebecken verfälscht worden sein könnten. Bei der Entlastungsmessung werden gemessene Überfallhöhen am Wehr über eine Q-h-Beziehung in ein Volumen umgerechnet. Bei einem Rückstau kann es zu einem unvollkommenen Überfall kommen, für den die Formel ungültig ist. Mit Rückstauproblematik würden wesentlich höhere Entlastungswassermengen aufgezeichnet als in Wirklichkeit aufgetreten sind. Um die Lage richtig einschätzen zu können wird eine Kamera mit Beleuchtung im Entlastungskanal vom RÜB Talstraße installiert. Die Kamera nimmt Bilder vom Klärüberlauf und dem angeschlossenen Entlastungskanal im Sekundentakt auf. Das untere linke Foto zeigt eine schwache, gerade beginnende Entlastung, während rechts ein Überlauf mit beträchtlichem Volumenstrom abgebildet ist.



**Abbildung 174: Kamerabilder vom Entlastungskanal des RÜB Talstraße**

Seit der Installation ist kein Niederschlagsereignis stark genug, um eine abschließende hydraulische Beurteilung zur geschilderten Problematik abgeben zu können. Bisher kann kein Rückstau nachgewiesen werden. Bei den aufgezeichneten Entlastungsereignissen ist zu beobachten, dass praktisch keine sichtbaren Feststoffe in das anschließende RRB gelangen. Auch bei kurzzeitigen Entlastungsereignissen hält das RÜB Feststoffe weitestgehend zurück. Dies wird durch die sehr geringen Konzentrationen aus den Laboranalysen bestätigt.

### 15.3 Kamera am RÜB Kalkofen

Am Trennbauwerk des RÜB Kalkofen, einem Durchlaufbecken im Nebenschluss, kommt eine weitere Kamera zur Anwendung. Im Sichtfeld der Kamera befindet sich die NH<sub>4</sub>-N-Messung „Kanal Kalkofen“ und der Einlauf vom Trennbauwerk zum RÜB. Der Kamera-Einsatz soll Aufschluss über die Messsituation der NH<sub>4</sub>-N-Sonde und deren aktuellen Verschmutzungsgrad sowie der Verhältnisse im Kanal und dem Beckenzulauf geben. Das Network Attached Storage-Laufwerk (NAS) bietet mit einem TByte ausreichend Kapazität zur Aufzeichnung von Kamerabildern über lange Zeit. Es verfügt über Server-Funktionen, die einen Fernzugriff per DSL und Internet-Browser ermöglichen. Zusätzlich lassen sich mobile Datenträger über USB-Schnittstelle zur Erweiterung des Netzwerkspeichers anschließen.



**Abbildung 175: Ex-Kamera „TBW RÜB Kalkofen“**



**Abbildung 176: Kameraaufnahme am RÜB Kalkofen**

Bilder vom Kameraeinsatz „RÜB Kalkofen“ sind besonders aufschlussreich bei der Entwicklung und Optimierung der bereits beschriebenen automatischen Reinigungseinrichtung.

## 16 Prognose der Belastung des Kläranlagenzulaufs mit künstlichen neuronalen Netzen

Es wird untersucht inwieweit sich die Belastung des Kläranlagenzulaufs im Hinblick auf  $\text{NH}_4\text{-N}$ - und CSB-Konzentrationen mit Hilfe von neuronalen Netzen - erstellt auf der Basis von KANNST-Messwerten - zeitlich vorhersagen lässt. In diesem Kapitel wird zunächst beispielhaft beschrieben wie bei der Erstellung eines Systems zur Prognose der Durchflusswassermenge im Zulauf der Kläranlage Homburg-Bröl vorgegangen wird. Zum Einstieg in die Thematik wird die Durchflussmenge als Zielgröße ausgewählt, weil hier eindeutige und übersichtliche Beziehungen zu den Eingangsparametern (Regen, Drosselwassermengen, Füllstände) bestehen. So ist z.B. klar, dass einem Anstieg des Kläranlagenzulaufs (bis auf seltene Ausnahmen) ein Regenereignis vorausgegangen sein muss, welches wiederum eine Erhöhung der Drosselwassermengen an den RÜB zur Folge hat. Stabile Zusammenhänge sind erforderlich um möglichst geeignete Kombinationen von Netzstrukturen, Einstellungen und Eingangsparametern zu bestimmen. Mit den aus dem Beispiel gewonnenen Erkenntnissen werden anschließend weitere Netze zur Prognose der Belastungskenngrößen „CSB- und  $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentration“ im Kläranlagenzulauf erstellt.

Die nachfolgenden Abschnitte enthalten:

- Grundlegende Informationen zum Themengebiet „neuronale Netze“
- Arbeitsschritte um ein Netz zu erstellen das die Prognose des Kläranlagenzulaufes (Durchflusswassermenge) ermöglicht
- Vorhersage von  $\text{NH}_4\text{-N}$ - und CSB-Konzentrationen (analoge Vorgehensweise wie bei der Netzerstellung zur Prognose der Durchflusswassermenge)
- Fazit: Beurteilung der Ergebnisse, Bedeutung hinsichtlich der praktischen Anwendbarkeit

### 16.1 Künstliche neuronale Netze<sup>56</sup>

Künstliche neuronale Netze (KNN) sind mathematische Konstrukte die vom Aufbau her dem menschlichen Gehirn nachempfunden sind. Es handelt sich dabei um ein stark vereinfachtes Modell des biologischen Vorbildes. Mit Hilfe von Computern modellierte Netze aus künstlichen Neuronen sind in der Lage komplexe Anwendungsprobleme der Informationsverarbeitung zu lösen. Ein spezielles Einsatzgebiet ist die Prädiktion und nichtlineare Modellierung von Zeitreihen. KNN können z.B. durch die mathematische Gewichtung der Verbindung von Neuronen trainiert werden. Sie sind in der Lage Muster zu erkennen und können komplizierte, nichtlineare Funktionen anhand von Algorithmen „erlernen“. Durch iterative oder rekursive Vorgehensweise werden aus den vorhandenen Eingangs- und gewünschten Ausgangswerten alle Parameter einer gesuchten Funktion berechnet. Mit Hilfe der so festgelegten Parameter wird eine Relation zwischen den beiden Wertemengen beschrieben. Seine besonderen Eigenschaften machen das KNN bei allen Anwendungen interessant, bei denen kein oder nur geringes systematisches Wissen über das zu lösende Problem vorliegt.

<sup>56</sup> Diplomarbeit „Entwicklung und Optimierung einer prädiktiven Regelung mit künstlichen Neuronalen Netzen und Fuzzy-Control zur Verfahrensoptimierung auf Kläranlagen“ (Martin Graner, Marc Weise 1999)

Die Arbeit mit den KNN beinhaltet folgende Arbeitsschritte:

1. Daten auswählen, zusammenstellen und aufbereiten
2. Netzwerk erstellen
3. Konfigurieren des Netzwerkes
4. Trainieren
5. Validieren
6. Benutzen / Anwenden des KNN

Alle diese Schritte werden nachfolgend anhand des Beispiels „Prognose der Durchflusswassermenge im Kläranlagenzulauf“ erläutert.

## 16.2 Prognose der Durchflusswassermenge im Kläranlagenzulauf

Im konkreten Fall werden zunächst einmal sämtliche Eingangsgrößen mit einem offensichtlichen Bezug zur Zielgröße ausgewählt:

- Drosselwassermengen an vorgelagerten Stellen des Kanalnetzes
- Füllhöhen in den Trennbauwerken der RÜB
- der Füllstand von RÜB Eckenbach (Becken im Hauptschluss, daher ohne TBW)
- Regendaten von den Stationen Rommelsdorf, Talstraße und KA.

Zielgröße ist die Zulaufwassermenge der Kläranlage Homburg-Bröl, die sich aus der Addition der Zuflüsse aus beiden Kanalnetzsträngen „Waldbröl“ und „Nümbrecht“ ergibt. Es werden 3-Minuten-Messwerte für einen Zeitrahmen von 8 Monaten (01.01. bis 01.09.2011) verwendet. Da gute Prognoseergebnisse maßgeblich von der Auswahl und Qualität der zusammengestellten Daten abhängen, ist dieser erste Arbeitsschritt besonders sorgfältig auszuführen. Die Auswahl eines geeigneten Zeitraumes - möglichst ohne Messwertausfälle und Messwertfehler wie z.B. fälschlicherweise über längere Zeiträume konstante Werte - ist entsprechend aufwändig. Im Rahmen einer Plausibilisierung werden kleinere Datenlücken nachträglich sinnvoll ergänzt. Danach wird ein geeigneter Prognosehorizont ermittelt mit der Zielsetzung eine möglichst langfristige Vorhersage mit guter Genauigkeit zu erreichen. Bei der Untersuchung verschiedener Regenereignisse wird deutlich, dass zwischen detektiertem Niederschlag und der Erhöhung des Kläranlagenzulaufs meist ein Zeitintervall von ca. 60 Minuten besteht (s. Abbildung 177).

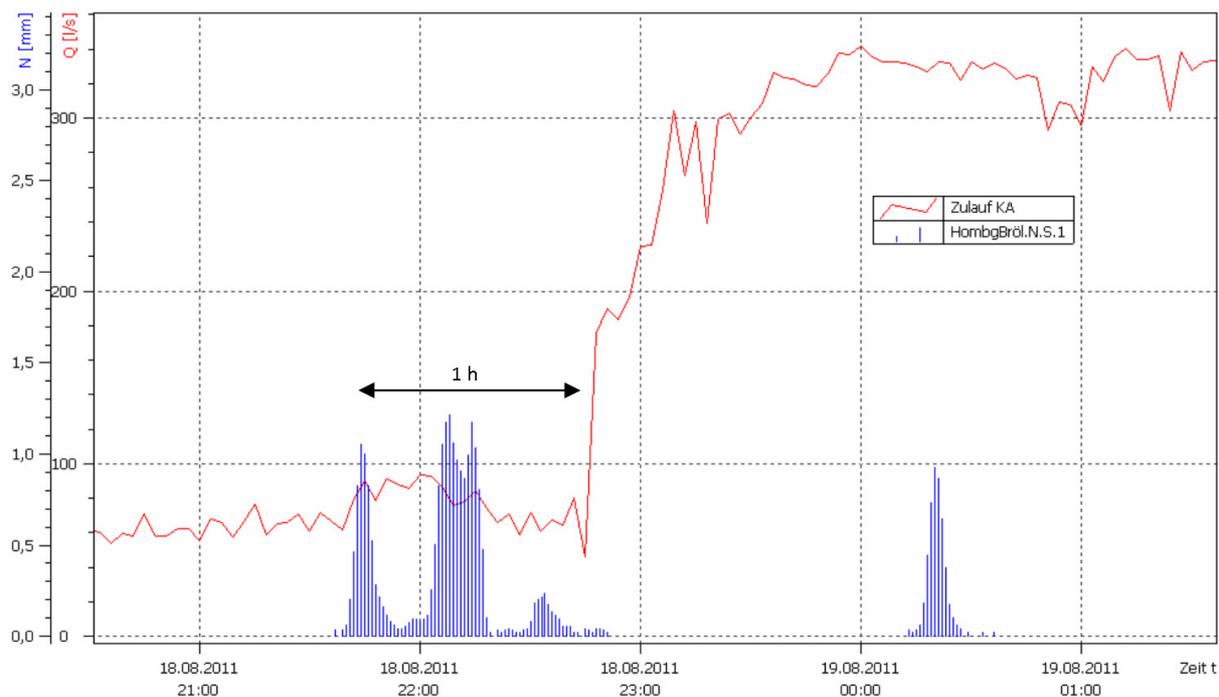


Abbildung 177: Zeitintervall Niederschlag - "Zulauf KA Homburg-Bröl"

Dieser Zeitabschnitt variiert in seiner Dauer nur geringfügig, je nachdem aus welcher Richtung der Regen heranzieht und von welchem Regenmesser er zuerst detektiert wird (Homburg-Bröl, Talstraße oder Rommelsdorf). Demnach wird als Ausgangsbasis ein Prognosehorizont von deutlich kleiner einer Stunde (51 Minuten) ausgewählt. Damit ist sichergestellt, dass eine Prognose auf der Grundlage von Eingangsgrößen erstellt wird, die bereits auf ein eintretendes Regenereignis reagieren. Mit wachsendem Prognosehorizont (Prognose über größere Zeiträume), gibt es hingegen immer weniger sinnvolle Anhaltspunkte für Training und Prognose. Des Weiteren müssen die Messdaten teilweise aufbereitet werden. Für die minütlich aufgezeichneten Regendaten ist eine Anpassung an das 3-Minuten Zeitraster der übrigen Messwerte erforderlich.

Damit das KNN aufgrund von aktuellen Eingangsgrößen die Ausgangsgrößen in 51 Minuten prognostizieren kann, werden zu Trainingszwecken die Eingangs- und Ausgangsdaten zeitlich gegeneinander um genau diesen Zeitraum verschoben.

Uhrzeit	Eingangswerte	Zielwert
00:00	1	1
00:03	2	2
00:06	3	3
00:09	4	4
00:12	5	5
00:15	6	6
00:18	7	7
00:21	8	8
00:24	9	9
00:27	10	10

Abbildung 178: Verschiebung „Eingangswerte / Ausgangswerte“

Aus Übersichtsgründen ist in der obigen Tabelle zur Verdeutlichung des Prinzips eine kleinere Verschiebung dargestellt (3 Messwerte entsprechend 9 Minuten). Die rot dargestellten Messwerte werden nicht verwendet, sodass die Anzahl der Eingangswerte mit der Menge der Zielwerte übereinstimmt. Mit Hilfe des Eingangswertes „1“ soll das KNN dieses Beispiels den Zielwert „4“ (Drosselwassermenge) möglichst genau ausgeben. Unabhängig von der obigen Tabelle wird tatsächlich mit einer Verschiebung entsprechend 51 Minuten und 12 verschiedenen Eingangswerten gearbeitet.

Das KNN wird mit Hilfe von MATLAB<sup>57</sup> unter Verwendung der „Neuronal Network Toolbox“ erstellt (Time Series Tool). Nachdem damit eine Netz-Architektur ausgewählt worden ist (in diesem Fall „Nonlinear Input-Output“, ohne Rückkopplung), und Eingangsdaten und Zielgröße zugeordnet sind, kann das Netzwerk konfiguriert werden.

Bei der Konfiguration wird die Anzahl der „versteckten Neuronen“ festgelegt. Mehrschichtige Netze besitzen neben der Ausgabeschicht auch verdeckte Schichten, deren Ausgaben außerhalb des Netzes unsichtbar sind. Die Neuronen in den verdeckten Schichten werden auch versteckte Neuronen genannt. Bei der Konfiguration der ausgewählten Netzarchitektur muss zusätzlich die Anzahl an „Delays“ angegeben werden. Der dort eingegebene Wert legt fest wie viele Eingangswerte aus der Vergangenheit zu jeder einzelnen Berechnung einer Zielgröße mit einbezogen werden sollen. Ein mit Zeitreihen (Messwertfolgen) gespeistes Netzwerk wird mit dieser Rückschau um ein „Gedächtnis“ erweitert, das förderlich zur Nachbildung dynamischer Systeme sein kann.

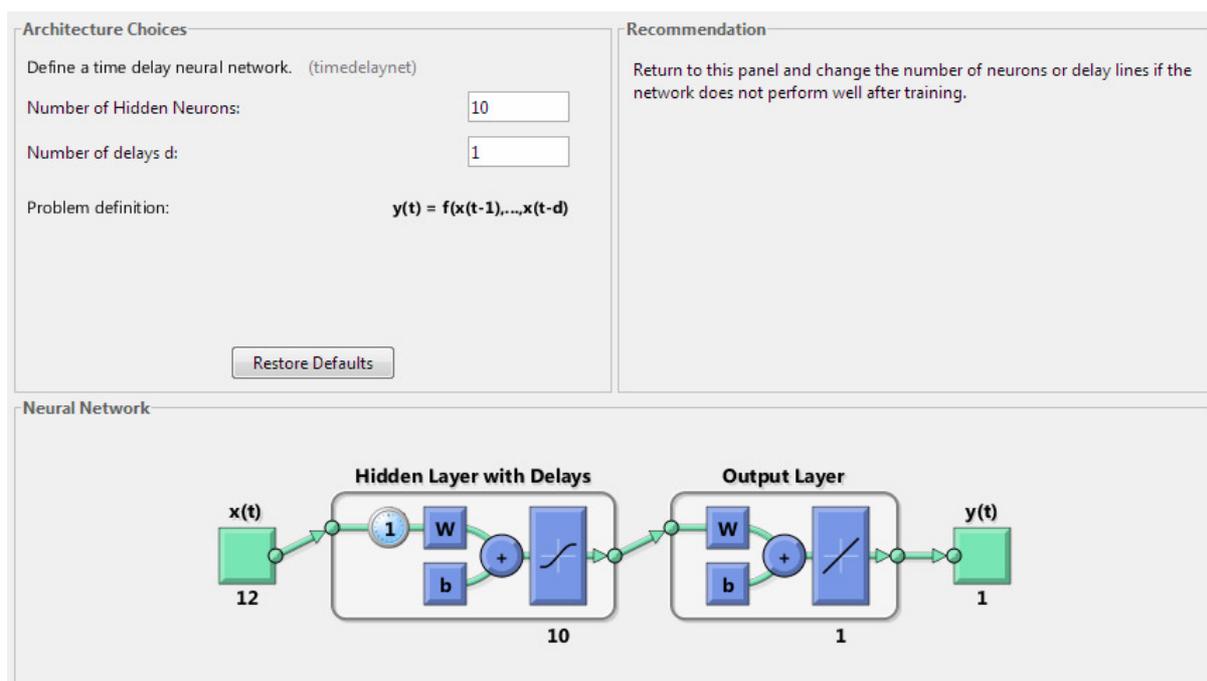


Abbildung 179: Konfiguration des Netzwerks mit MATLAB (Quelle: MATLAB R2011b, Neural Network Time Series Tool)

Eine höhere Anzahl von Neuronen kann sich als vor- und nachteilhaft auswirken. Mit zunehmender Anzahl von Neuronen steigt zwar die Leistungsfähigkeit, aber es wächst auch die Gefahr einer „Überanpassung“ (overfitting). Hierbei wird die Zielgröße für die Trainingsdaten ausgezeichnet getroffen, allerdings sind die Ergebnisse für beliebige unbekannte Eingangsdaten dann nicht mehr zufriedenstellend. Mit der Anzahl an Delays und Neuronen steigen Rechenaufwand und Speicherbedarf beim

<sup>57</sup> Programm der Firma „The MathWorks Inc.“ zur Lösung mathematischer Probleme

Training. In Probeläufen mit unterschiedlichen Einstellungen haben sich diese Einstellungen bewährt: 10 versteckte Neuronen / Anzahl an Delays: 1 (siehe obige Abbildung).

Im nächsten Schritt wird das verfügbare Datenmaterial in 3 Blöcke aufgeteilt. Der größte Anteil wird für die wichtige Trainingsphase verwendet (70%). Die übrigen Daten verteilen sich hier auf Validierung (25%) und Test (5%). In der Trainingsphase lernt das neuronale Netz anhand des vorgegebenen Datenmaterials nach bestimmten Algorithmen. Hier werden die Gewichte zwischen den Neuronen solange modifiziert bis berechnete Fehlerterme hinreichend klein genug geworden sind. Dies ist der Fall wenn erwünschte und durch das Netz produzierte Ausgabewerte möglichst weitgehend übereinstimmen. Trainiert wird nach dem verbreiteten Verfahren „Levenberg-Marquardt-Backpropagation“ bei dem Gewicht und Schwellwert (engl. bias) der Neuronen eingestellt werden.

Es erfolgen automatisch Validierungsphasen bei denen gemessen wird wie allgemeingültig das trainierte KNN arbeitet. Es wird dabei überprüft ob das Netz mit bisher unbekannten Eingangsdaten ausreichend gute Ausgangswerte erzeugen kann. Das Training wird beendet wenn bestimmte Bedingungen erfüllt sind. Das ist der Fall wenn die Allgemeingültigkeit nicht mehr verbessert werden kann oder die vorgegebenen Performance-Ziele erreicht sind. In der anschließenden Testphase findet eine unabhängige Bewertung der Leistungsfähigkeit des Netzes während und nach dem Training anhand von bisher nicht verwendeter Eingangs- und Ausgangswerten statt. Im konkreten Fall wird der Datenanteil, welcher für den Test bereitgehalten werden soll absichtlich klein gehalten (5%) damit umso mehr Messwerte für Training und Validierung zur Verfügung stehen. Die folgenden Regressionsgrafiken zeigen Netzausgaben aus Trainings-, Validations- und Testphase mit ihrem Abstand zu den jeweiligen Zielwerten, die auf den farbigen Regressionsgeraden liegen.

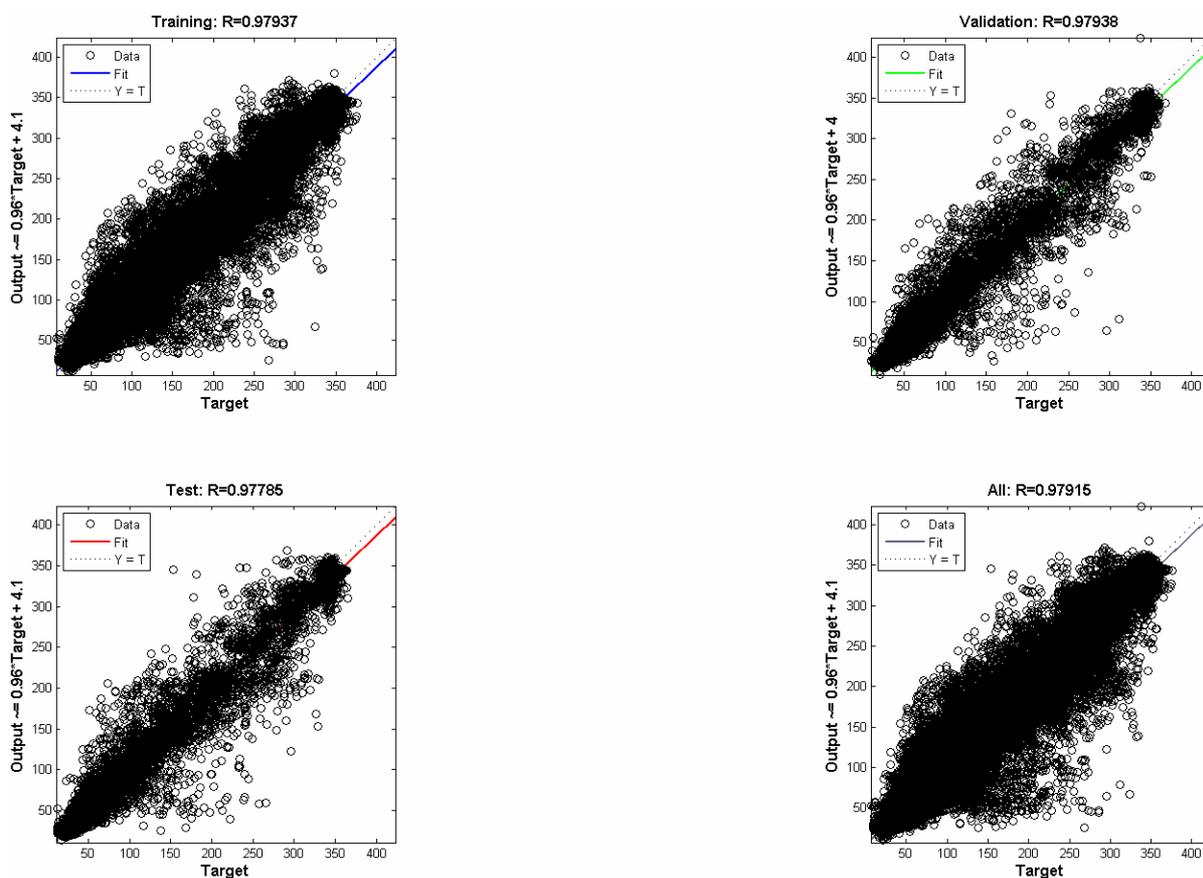
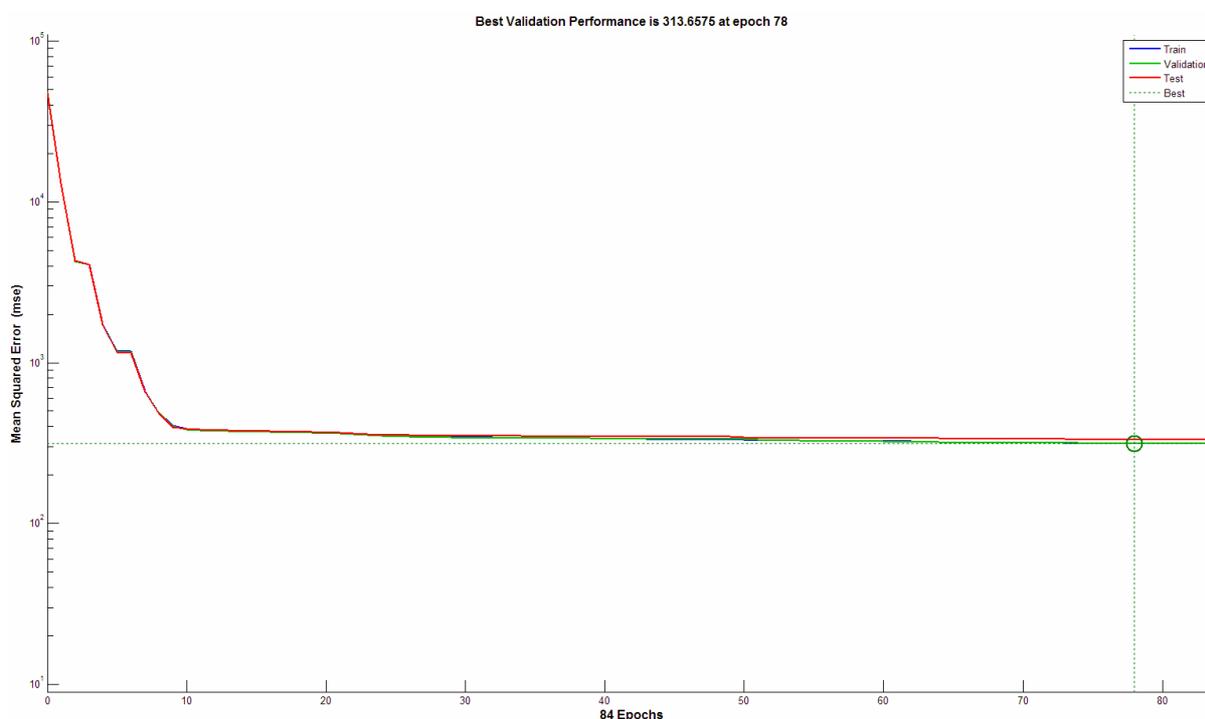


Abbildung 180: Regressionsdiagramme, Qd (Quelle: MATLAB R2011b, Neural Network Time Series Tool)

Im Idealfall befinden sich alle Ausgangswerte, dargestellt durch kleine schwarze Kreise, exakt auf der 1. Winkelhalbierenden. Das Bestimmtheitsmaß „R“ kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen und steht für die Wahrscheinlichkeit eines linearen Zusammenhangs (0 bedeutet kein Zusammenhang, 1 entspricht einer linearen Beziehung).

Die Grafiken mit den relativ geringen Abweichungen der Netzausgaben zu den Idealwerten in Kombination mit einem R nahe 1 (0,979) lassen bereits auf eine gute Prognosefähigkeit des Netzes hinsichtlich der Zielgröße schließen (s. Abbildung 180).

Auf der unteren Grafik ist zu erkennen, dass die größten Verbesserungen bereits innerhalb der ersten 10 Trainingsdurchläufe erreicht werden. Der mittlere quadratische Fehler (engl. mean squared error, mse) sinkt in weiteren Zyklen nur relativ gering. Das Training wird in diesem Fall nach 84 Durchläufen beendet.



**Abbildung 181: Verlauf des mittlerem quadratischen Fehlers beim Training (Quelle: MATLAB R2011b , Neural Network Time Series Tool)**

Ein kleiner mittlerer quadratischer Fehler bedeutet in diesem Fall dass die Ausgaben des KNN im Mittel nahe an den Zielvorgaben liegen und eine geringe Varianz aufweisen.

Die folgenden drei Diagramme zeigen Ergebnisse, die unter Verwendung des zuvor erstellten KNN entstehen. Enthalten sind immer die Prognose (rote Kurve) und der tatsächlich gemessene Kläranlagenzulauf (blaue Kurve). Bei der Prognose handelt es sich jeweils um die Netzantwort auf Eingangsdaten des betreffenden Zeitraumes. Das erste Diagramm zeigt den gesamten Zeitraum, während die nächsten beiden Schaubilder zunehmend kleinere Zeiträume darstellen. Bei Ansicht der Abbildung 182 ist eine weitgehende Übereinstimmung von Prognose und Zielwerten nur zu erahnen, da sich die Kurven in weiten Teilen überdecken.

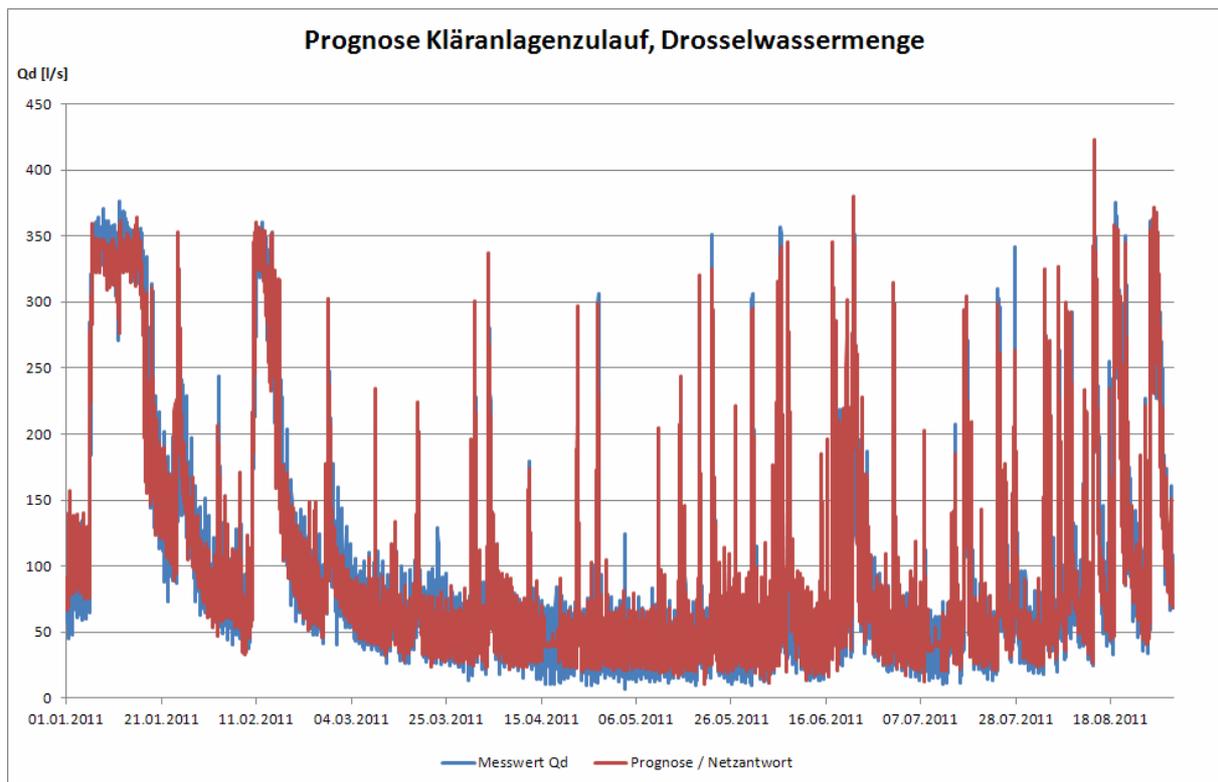


Abbildung 182: Prognose der Drosselwassermenge, gesamter Zeitraum

Auf dem nächsten Diagramm ist zu erkennen, dass das KNN anhand der Eingangsdaten typische Tagesgänge erzeugt hat. Die Verhältnisse bei einem Regenereignis werden stimmig vorhergesagt.

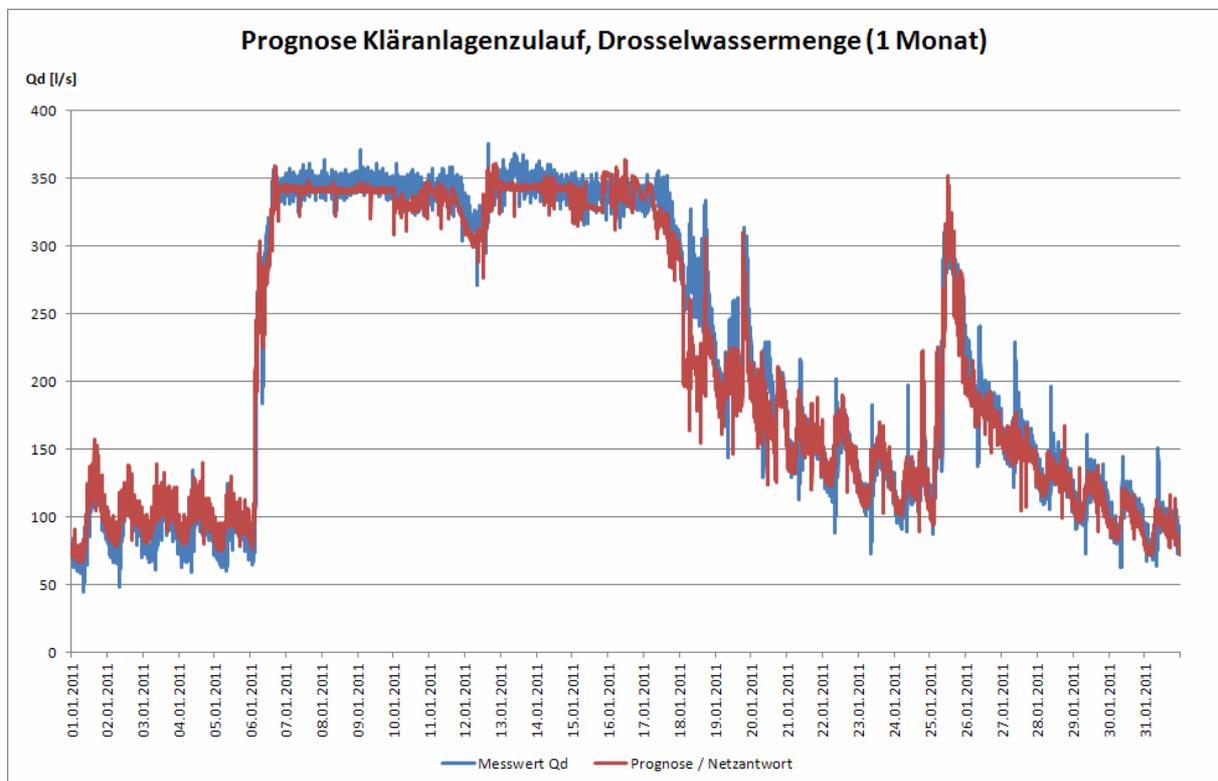
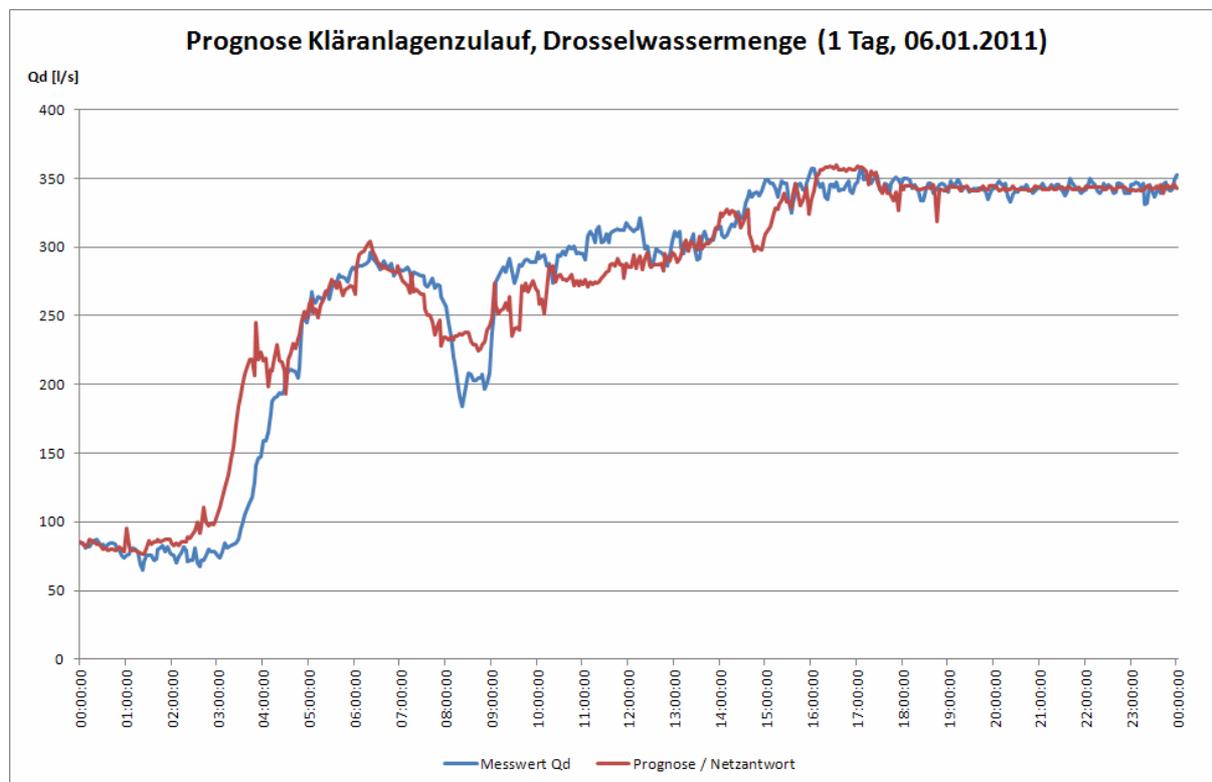


Abbildung 183: Prognose der Drosselwassermenge, Januar 2011

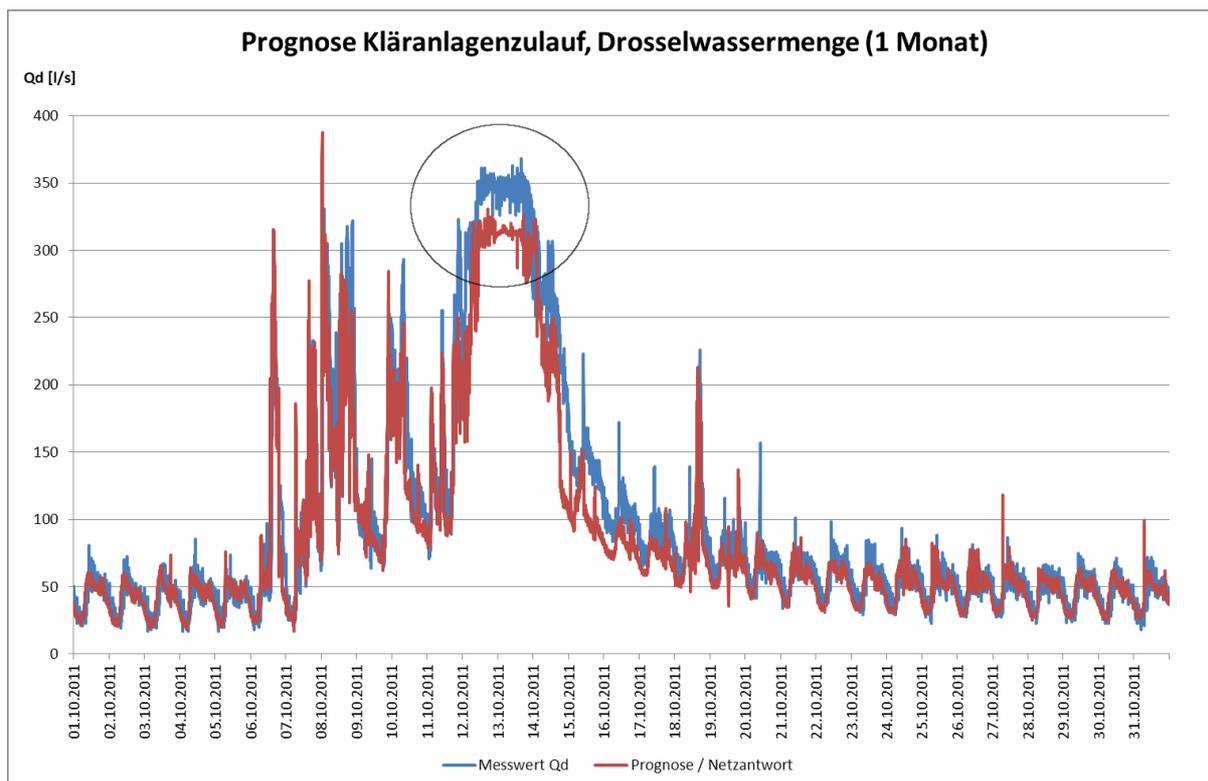
Auf dem folgenden Tagesdiagramm entsprechen sich die beiden Verläufe ebenfalls weitgehend. Außerdem wird bei der verwendeten zeitlichen Auflösung der Versatz zwischen Prognose und Messwertverlauf deutlich.



**Abbildung 184: Prognose der Drosselwassermenge, 06.01.2011**

Wie bereits erwähnt, wird das Netz zur Prognose der Drosselwassermenge nur mit einem geringen Prozentsatz des gesamten Datenaufkommens mit unabhängigen Daten auf Allgemeingültigkeit hin getestet (5% der Daten vom 01.09.2011 bis zum 31.12.2011). Zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit wird anstelle einer ausgeprägten Testphase eine umfangreiche Anwendung des Netzes mit neuen Messwerten durchgeführt, die weder für Training, Validierung noch Test verwendet worden sind. Dazu wird das Netz mit bereitgestellten Eingangswerten von Oktober 2011 beschickt und die daraus resultierende Netzantwort (Prognose) den tatsächlich gemessenen Zulaufmengen gegenübergestellt. Die Ergebnisse dieses zusätzlichen Tests werden durch das folgende Diagramm wiedergegeben.

Es ist grundsätzlich erkennbar, dass die Prognose auch dann einen hohen Erfüllungsgrad aufweist, wenn Eingangsdaten als Grundlage verwendet werden, die nicht bei der Erstellung des KNN benutzt worden sind. Tagesgänge werden von der Prognose gut abgebildet, die Verläufe entsprechen sich in weiten Teilen.



**Abbildung 185: Prognose aufgrund von bisher unbenutzten Eingangsdaten, Oktober 2011**

Allerdings sind im markierten Bereich dennoch deutliche Abweichungen zwischen Prognose- und Messwerten festzustellen: Die prognostizierte Drosselwassermenge (rote Kurve) liegt beträchtlich unterhalb des tatsächlich aufgetretenen Durchflusses. Als Ursache dafür konnte der atypische Verlauf eines Eingangswertes im betreffenden Zeitraum ausgemacht werden: Die Drosselwassermenge am RÜB Eckenbach ist wegen einer Störung mit 38 l/s und darunter bei gefülltem RÜB geringer als üblich (s. Abbildung 188). Füllstand und Durchfluss „Eckenbach“ gehören zu den Eingangsparametern des KNN und haben Einfluss auf die prognostizierte Drosselwassermenge am KA-Zulauf. Die Vorhersage ist bereichsweise weniger gut, wenn Eingangsgrößen einen Verlauf aufweisen der in der Trainingsphase so nicht aufgetreten ist.

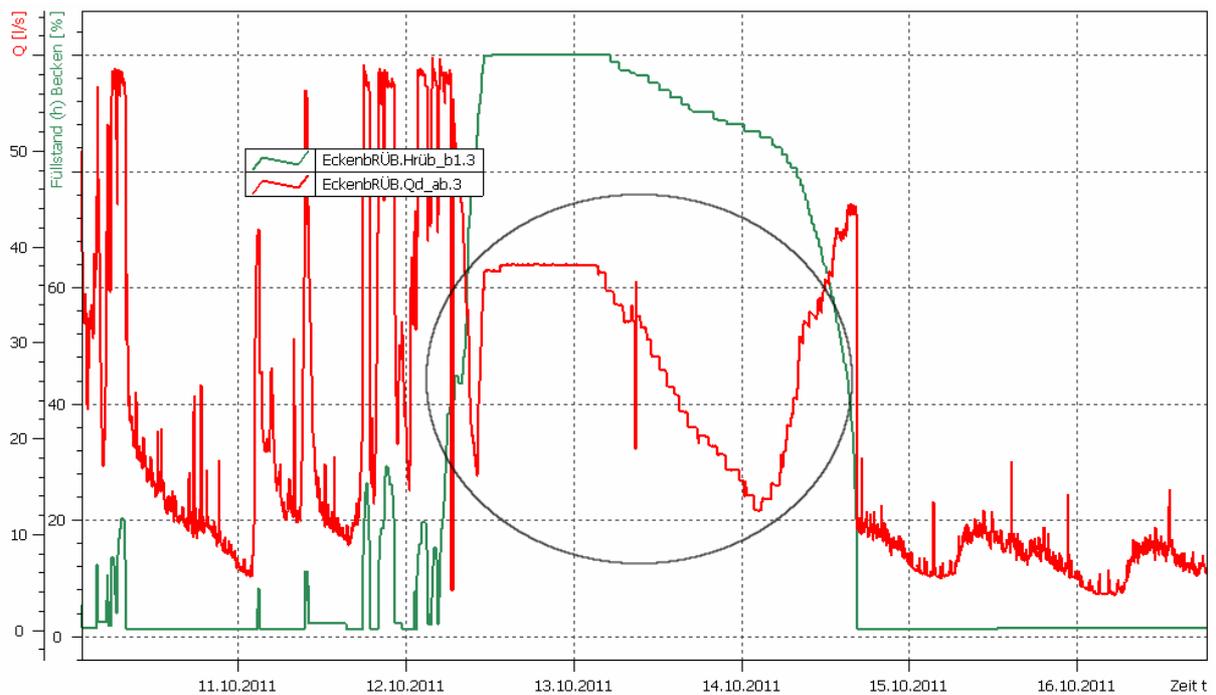
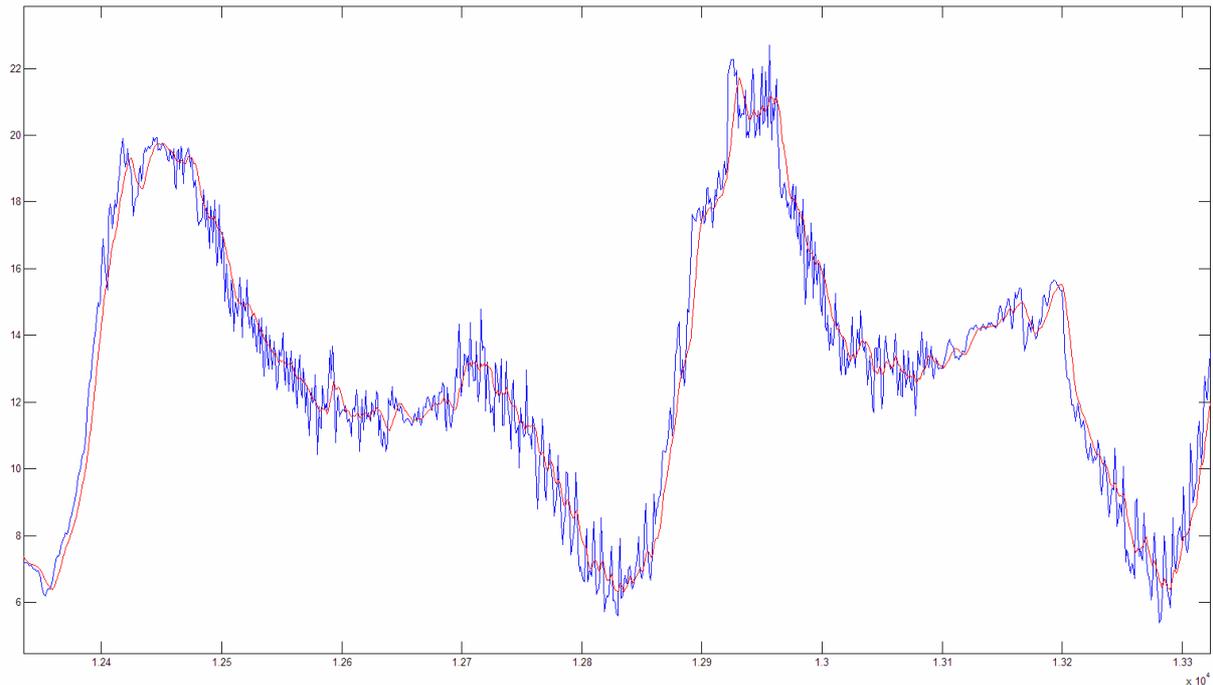


Abbildung 186: Störung RÜB Eckenbach

### 16.3 Prognose der $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentration im Kläranlagenzulauf

Dieser Abschnitt behandelt die Prognose der  $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentration mit einem neuronalen Netz. Die Schritte bei der Netzerstellung decken sich mit denen aus dem vorangegangenen Beispiel. Es werden auch die gleichen Eingangsparameter verwendet (Füllstände, Regen, Drosselwassermengen im Kanalnetz). Als zusätzliche Eingangsgröße kommen Werte der Leitfähigkeitsmessung in Frage. Da diese Messung auf dem Kläranlagengelände hinter dem Rechenhaus direkt neben der  $\text{NH}_4\text{-N}$ -Messung angeordnet ist, gibt es keinen zeitlichen Versatz - eine ansatzweise Korrelation zwischen beiden Größen ( $\text{NH}_4\text{-N}$  / Leitfähigkeit) vorausgesetzt. Die Verwendung von Leitfähigkeitswerten als zusätzliche Eingangsgröße erscheint daher für die Verbesserung der Prognose ungeeignet.

Leider ist die Onlinemessung der  $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentration viel wartungsintensiver und störungsanfälliger als die Messung der Drosselwassermenge aus dem vorangegangenen Beispiel. Darum ist die Messwertqualität hier trotz erheblichem Aufwand deutlich schlechter. Um dem Rechnung zu tragen und den Einfluss von „Messwertausreißern“ zu minimieren, werden die Zielwerte mit einem gleitenden Mittel über 10 aufeinander folgende Messwerte digital gefiltert (Tiefpasscharakteristik).



**Abbildung 187: Glättung der Zielwerte, gleitender Mittelwert**

Die rote Kurve gibt den Verlauf der gefilterten Messwerte über einen Zeitraum von etwa zwei Tagen wieder, während die blaue Kurve die unbearbeiteten Werte abbildet.

Die Konfiguration des Netzes zur  $\text{NH}_4\text{-N}$ -Prognose erfolgt wie bei der Netzerstellung „Prognose Drosselwassermenge“ aus dem vorangegangenen Abschnitt mit einer Ausnahme. Die Messwerte des gesamten Zeitraumes werden unterschiedlich auf die einzelnen Phasen aufgeteilt. Weil der Gesamtzeitraum verwendbarer  $\text{NH}_4\text{-N}$ -Werte mit 4 Monaten deutlich kleiner ist, wird auf einen separaten Test zur Allgemeingültigkeit verzichtet. Dafür wird der programminterne Datenanteil für unabhängige Tests bei der Netzwerkerstellung von zuvor 5% auf 15% erhöht. Folgende Verteilung wird verwendet: Training: 70% / Validierung: 15% / Test: 15%.

In die unteren Regressionsdiagramme sind Netzantworten aus den unterschiedlichen Phasen der Netzerstellung eingetragen. Die Abweichungen sind erheblich größer als im vorangegangenen Beispielfall. Dafür spricht auch das niedrigere Bestimmtheitsmaß  $R$ . Wird auf den zuvor beschriebenen digitalen Filter verzichtet, so wird  $R$  noch kleiner (All:  $R=0,782$ ).

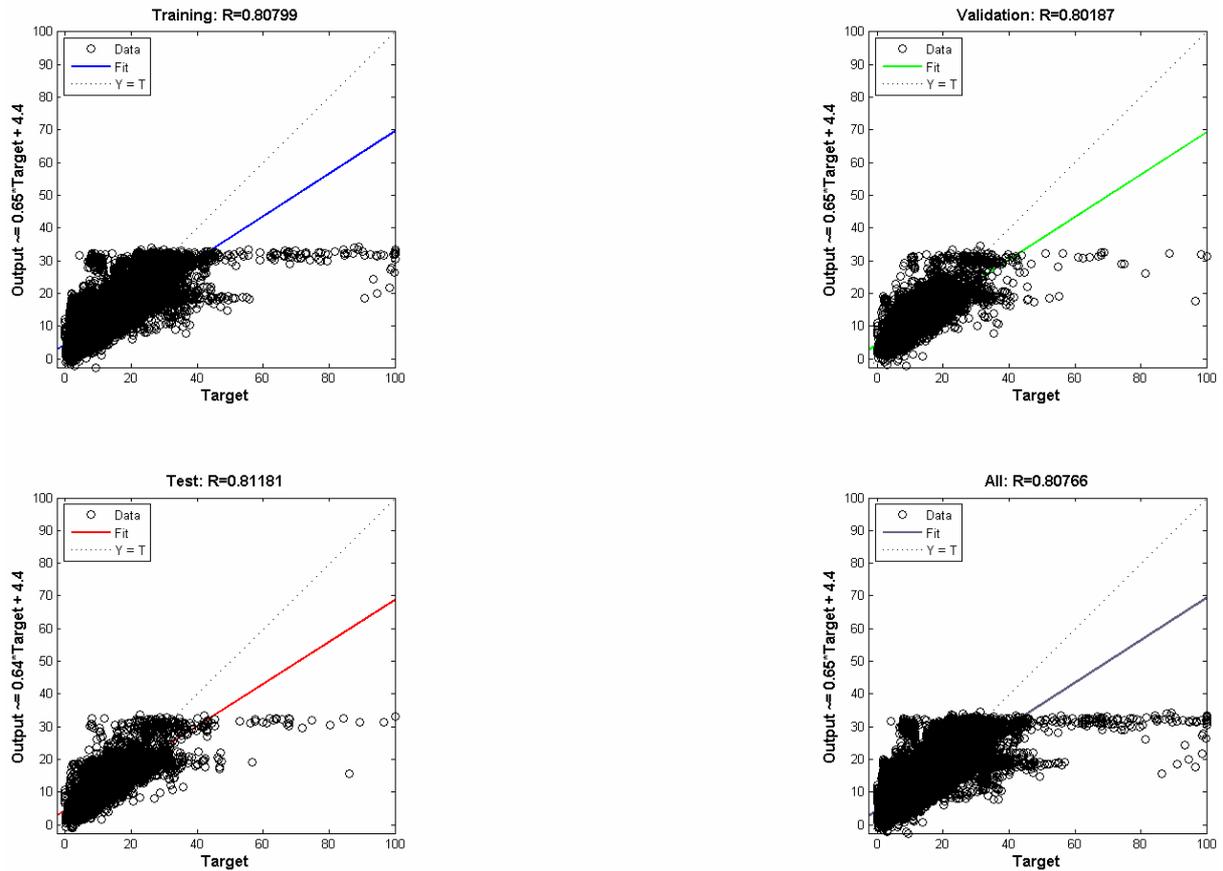


Abbildung 188: Regressionsdiagramme, NH4-N (Quelle: MATLAB R2011b, Neural Network Time Series Tool)

Die Abbildung 189 zeigt prognostizierte und gemessene NH4-N-Werte über den gesamten Zeitraum von vier Monaten. Es wird deutlich, dass bei dieser Auflösung beide (Prognose/Ziel) in weiten Teilen deckungsgleich sind. Die Prognose gibt Regen- und Trockenphasen wieder, Tendenzen stimmen in diesem groben Rahmen überein. Bei genauerer Betrachtung kleiner Zeiträume ist das Ergebnis hingegen weniger zufriedenstellend. In dem Diagramm „Prognose NH4-N über einen Zeitraum von zwei Wochen“ sind erhebliche Abweichungen zu sehen: Tagesgänge, -maxima und -minima der Messwerte werden von der Prognose häufig nicht getroffen. Eine belastbare Prognose über einen Zeitraum von 51 Minuten ist bei diesem Ergebnis kritisch zu sehen.

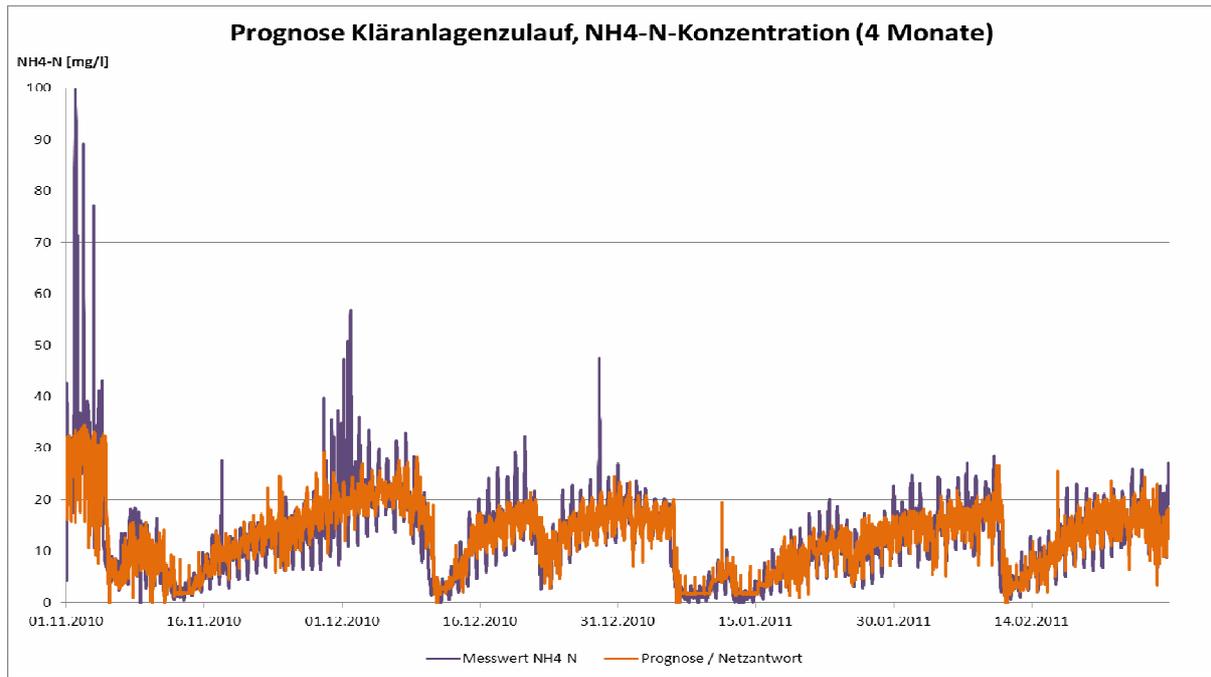


Abbildung 189: Prognose NH4-N, gesamter Zeitraum

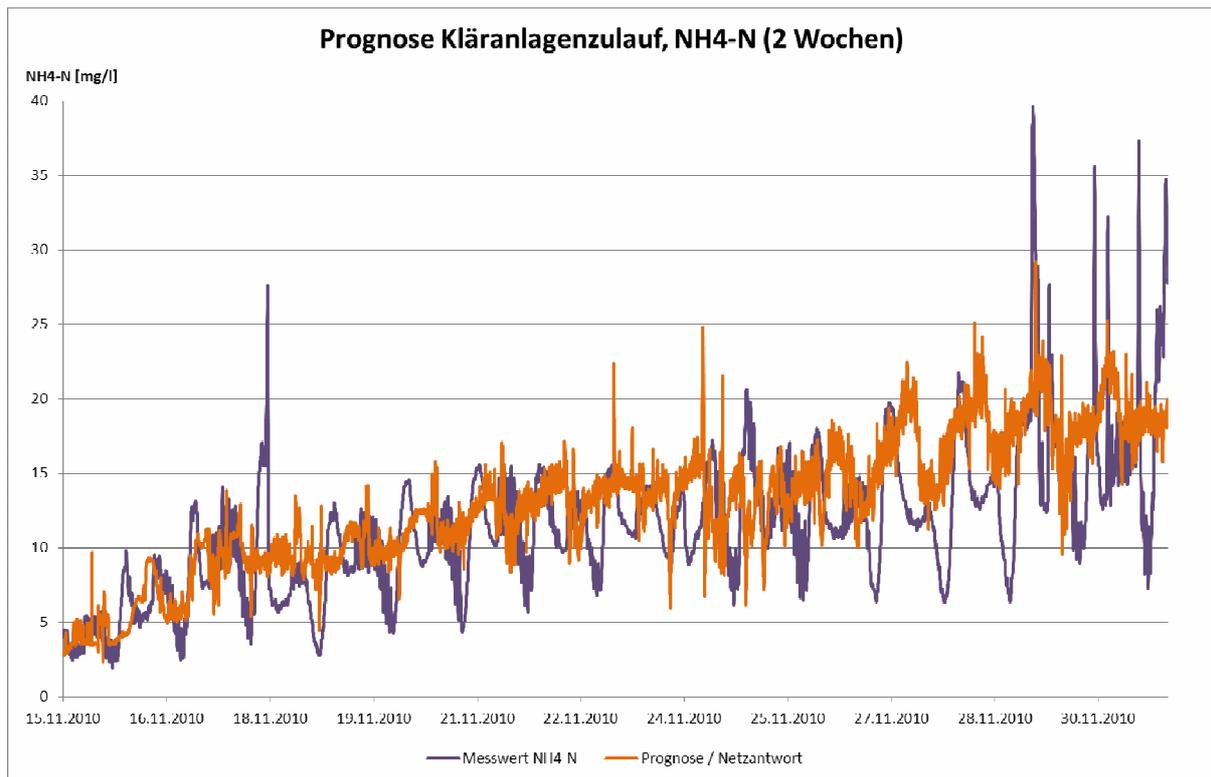


Abbildung 190: Prognose NH4-N über einen Zeitraum von zwei Wochen

## 16.4 Prognose der CSB-Konzentration im Kläranlagenzulauf

Bei der Erstellung des KNN zur Prognose der CSB-Konzentration wird exakt so verfahren wie im vorangegangenen Abschnitt. Es werden die gleichen Einstellungen verwendet, die Daten werden im gleichen Verhältnis den einzelnen Phasen zugeordnet und es wird der beschriebene digitale Filter zum Glätten der Zielwerte (hier CSB) eingesetzt. Die Regressionsdiagramme deuten auf ein etwas besse-

res Ergebnis hin als bei der NH4-N-Prognose. Das Bestimmtheitsmaß R liegt aber deutlich unter dem Wert, der vom KNN zur Prognose der Drosselwassermenge erreicht worden ist.

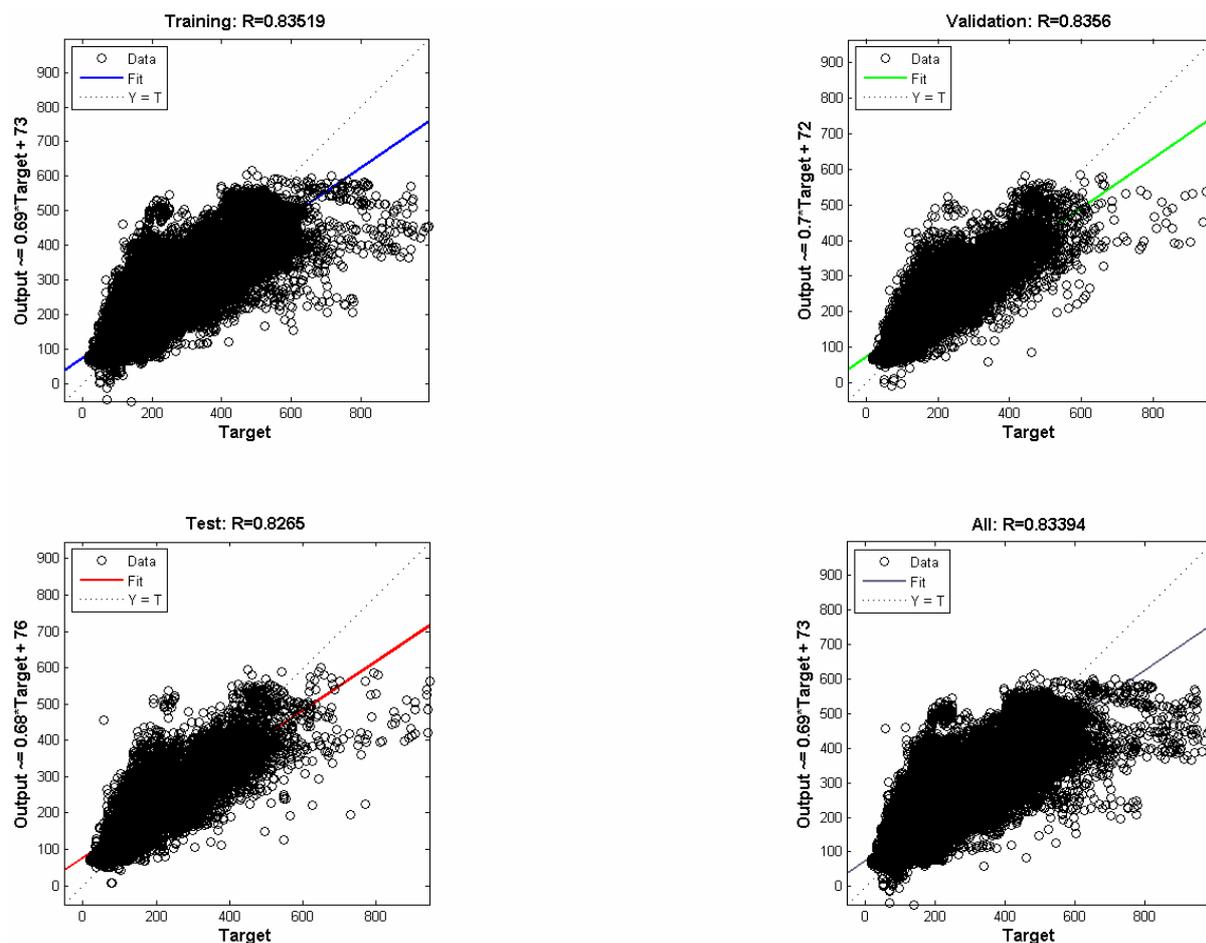


Abbildung 191: Regressionsdiagramme, CSB (Quelle: MATLAB, Neural Network Time Series Tool)

Dieser erste Eindruck wird von Abbildung 192 und Abbildung 193 bestätigt. Ähnlich wie im letzten Abschnitt bei der NH4-N-Prognose zeigen sich bei der Betrachtung von größeren Zeiträumen weitgehende Übereinstimmungen im Verlauf von Prognose- und Messwerten. Richtet man den Focus gezielt auf kleinere Zeitabschnitte, so offenbaren sich auch hier wieder Abweichungen. Besonders Tagesminima werden von der Prognose nicht korrekt abgebildet. Eine verlässliche Vorhersage mit einem Prognosehorizont von 51 Minuten ist demnach mit dem verwendeten KNN in Verbindung mit den bereitstehenden Messwerten nicht möglich.

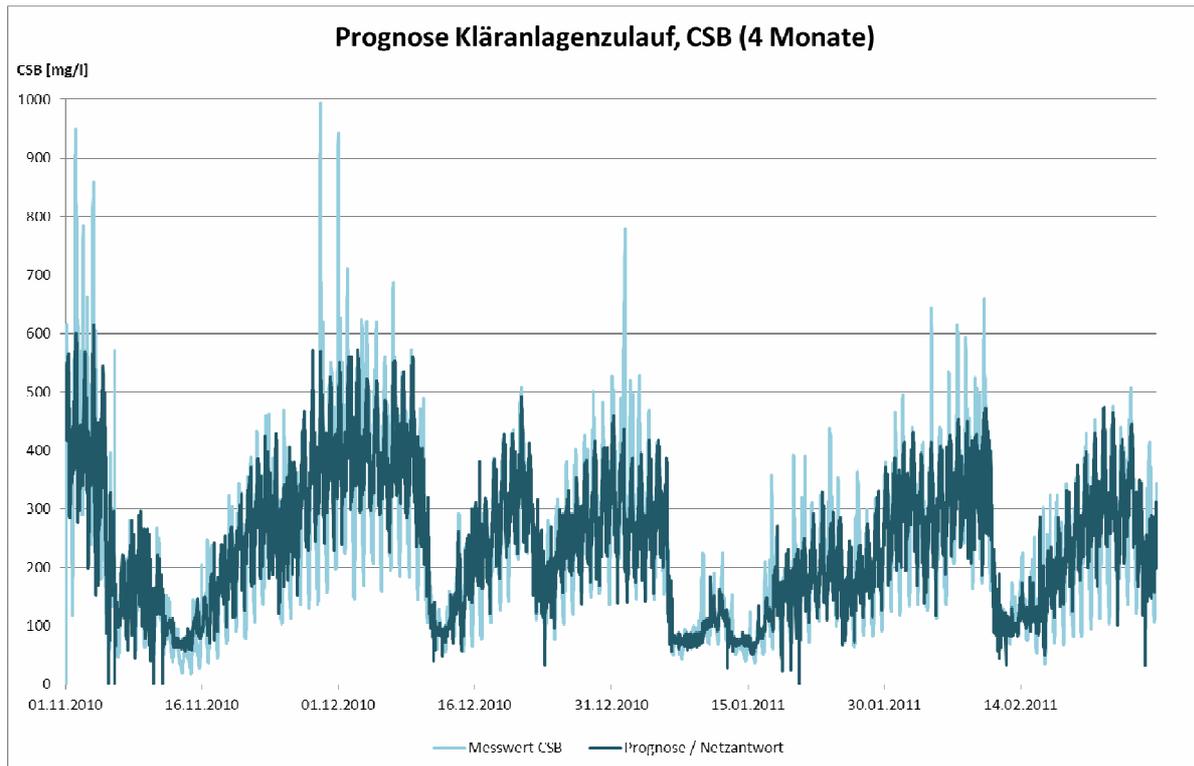


Abbildung 192: Prognose CSB, gesamter Zeitraum

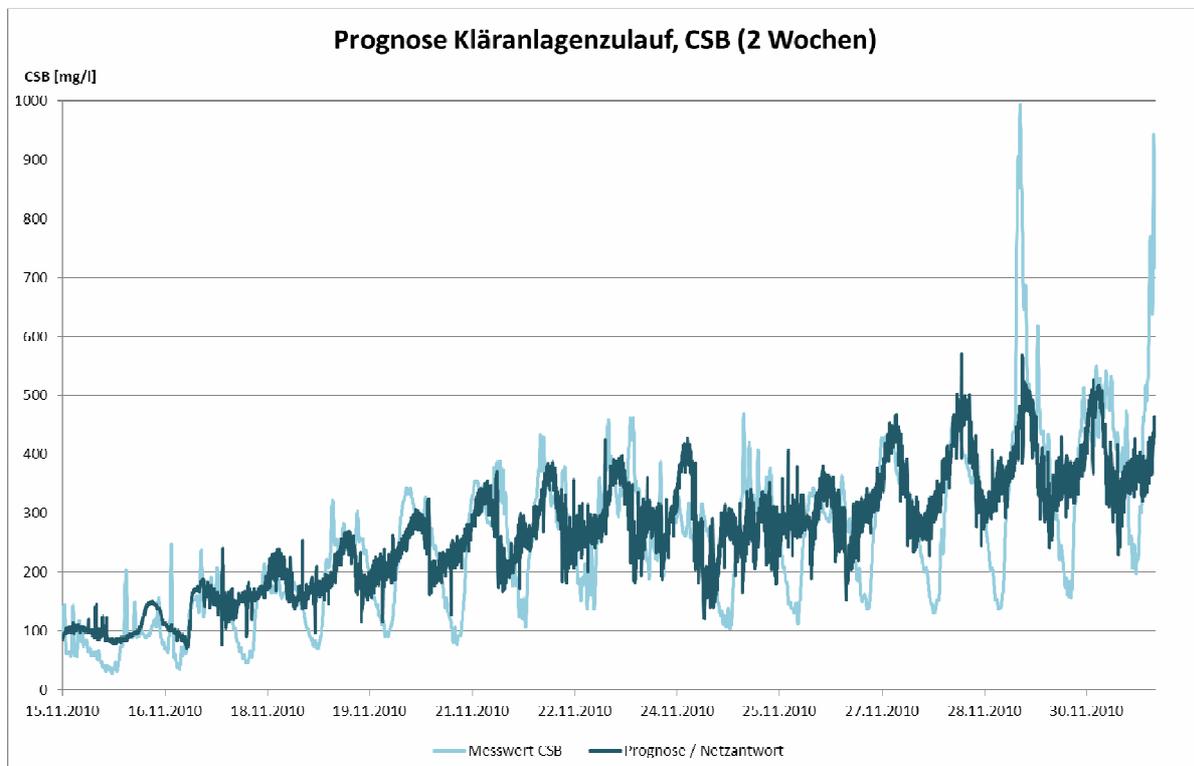


Abbildung 193: Prognose CSB über einen Zeitraum von zwei Wochen

## 16.5 Ergebnis der Prognosen

Die Prädiktion des Kläranlagenzulaufs (Volumenstrom) mit Hilfe des erstellten neuronalen Netzes über einen Zeitraum von 51 Minuten funktioniert mit brauchbarer Genauigkeit. Der Prognosefehler vergrößert sich allerdings deutlich, sobald nur eine der 12 Eingangsgrößen gestört ist. Wird beispielsweise eine Füllstandsmessung neu kalibriert und damit der Nullpunkt der Messung verschoben, so muss das KNN neu trainiert werden um weiterhin eine treffende Prognose zu gewährleisten.

Die verwendeten Füllstandsmessungen im Trennbauwerk der RÜB werden üblicherweise im Rahmen einer jährlichen Wartung neu justiert. Umgekehrt könnte man die Prognose dazu verwenden die einwandfreie Funktion der Messungen zu überprüfen, welche die Eingangswerte produzieren. Weicht die Prognose erheblich von der gemessenen Zulaufmenge ab, so deutet dies auf eine fehlerhafte Eingangsgröße hin. Grundlage der Prognose des Kläranlagenzulaufes entspricht einer Abbildung (Simulation) des Kanalnetzes hinsichtlich der Zielgröße.

Bei der Prognose der Belastung des Kläranlagenzulaufs (Konzentrationen  $\text{NH}_4\text{-N}$  und CSB) können die tatsächlichen Messwertverläufe nicht exakt getroffen werden. Das KNN produziert keine Verläufe mit der Dynamik typischer Tagesgänge. Eine belastbare Vorhersage ist demnach nicht möglich. Da die prognostizierten Werte von ihrem Betrag her dem allgemeinen Trend der Messwerte folgen, kann eine grobe Fehlfunktion (z.B. Verschmutzung der Sonde) erkannt werden. Weicht der Messwert über längere Zeit stark von der Prognose ab, deutet dies auf eine fehlerhafte Messung hin. Die Konzentrationen von  $\text{NH}_4\text{-N}$  und CSB sind deutlich schwerer zu prognostizieren, da als Grundlage Zielgrößen mit wartungsintensiven Onlinemessungen über große Zeiträume und mit hoher Qualität aufgenommen werden müssen.

## 17 Anwendung der Steuerstrategie

Ein definiertes Ziel im Projekt KANNST lautet, speziell die Belastung des Vorfluters wirkungsvoller als bisher zu reduzieren und bei der geplanten Steuerstrategie die Ammonium-Belastung und/oder die CSB-Belastung zu gleichmäßigen.

Die Forderung nach einer Reduzierung der Immissionen aus dem Kanalnetz ins Gewässer bezogen auf Ammoniumstickstoff oder CSB, beinhaltet die Betrachtung der Frachten und Konzentrationsspitzen die aus dem Kanalnetz ins Gewässer gelangen. In Anbetracht der  $\text{NH}_4\text{-N}$  Relevanz für das Lachs-laichgewässer der Bröl und der möglichen Bildung von Fischgift, wird die rein hydraulische Regelung um eine Fracht- und konzentrationsabhängige Strategie erweitert. Die optimierte hydraulische Regelung ist die erste Stufe in der Verbundsteuerung. Diese wird im Laufe des Projekts um zwei konzentrations- und frachtabhängige Stufen (Stufe 2 und Stufe 3) erweitert. Stufe 2 ist eine Regelung die sich aus speziellen Anforderungen im Sommer und Winter ergeben und Stufe 3 ist eine Fracht- und Konzentrationsregelung abhängig von Online-Messungen.

### 17.1 Regler Stufe 1 – optimierte hydraulische Regelung

In Stufe 1 wird ein Regelungskonzept entwickelt welches sicherstellt, dass Entlastungen an den Regenüberlaufbecken erst dann auftreten, wenn die hydraulische Kapazität des Netzes weitestgehend ausgeschöpft ist (siehe Kapitel 9). Diese Stufe ist Grundlage für die weiteren Stufen 2 und 3, die hier im Folgenden vorgestellt und erläutert werden.

Zunächst eine Übersicht der Stufen:

- **Stufe 1 – optimierte hydraulische Regelung**
  - Optimale Nutzung der vorhandenen hydraulischen Kapazitäten.
- **Stufe 2 – Konzentrations-/Frachtregler (Sommer/Winter)**
  - Sommerbetrieb - Becken an gefährdeten Stellen des Bachlaufs werden bevorzugt behandelt und die Entlastung vermieden bzw. verringert.
  - Winterbetrieb – bei RÜB die historisch häufiger eine höhere  $\text{NH}_4\text{-N}$  Fracht in der Entlastung aufgewiesen haben, werden Entlastungen verstärkt vermieden bzw. verringert.
- **Stufe 3 – Regelung nach Online-Messungen**
  - Die  $\text{NH}_4\text{-N}$  Konzentration wird online gemessen und es wird abhängig von der Ammoniumstickstoff-Fracht bzw. -Konzentration im RÜB geregelt.

### 17.2 Die zwei Phasen im Regler Stufe 2

Nach dem erfolgreichen Abschluss der ersten Stufe folgt die zweite, in der Schmutzstoff-Parameter, zum optimalen Schutz des Gewässers, in die Regelung mit aufgenommen werden. Die geplanten

Maßnahmen für eine frachtabhängige Regelung und die Sichtweise zu Beginn des Projekts gehen aus den Optimierungszielen im Förderantrag hervor.

Diese Grundgedanken und die weiteren Erfahrungen, die in den vergangenen Projektjahren gesammelt werden konnten, werden in ein schmutzstoffabhängiges Regelungskonzept umgesetzt, das im Folgenden für eine fracht- und konzentrationsabhängige Regelung vorgestellt und genauer beschrieben wird.

Schwerpunkte sind dabei Optimierung und Reduzierung der immissionsorientierten Belastungen des Gewässers durch Einleitungen aus dem Kanalnetz. Die fracht- und konzentrationsabhängige Regelung bezieht sich auf den Schmutzstoffparameter  $\text{NH}_4\text{-N}$ . Obwohl die Kläranlage in das Regelungskonzept mit einbezogen wird, ist es hier kein vorrangiges Ziel die  $\text{NH}_4\text{-N}$ -Spitzen im KA-Zulauf vollständig zu verhindern. Kurzfristig höhere Konzentrationen stellen kein Problem dar, weil die Biologie der Anlage dafür ausgelegt ist.

Der Regler in Stufe 2 wird in zwei Phasen unterteilt

**Phase (1): Sommerbetrieb = Gewässerorientierte Steuerung abhängig von Konzentrationsspitzen**

Hinweis: Für den Sommerbetrieb ist es vorgesehen, den Bachlauf vor gefährlichen Konzentrationsspitzen aus den Entlastungen der Regenüberlaufbecken an besonders empfindlichen Einleitungsstellen zu schützen.

Gerade in wärmeren und trockeneren Wetterphasen können kurzfristige Konzentrationsspitzen dem Bachlauf und der darin befindlichen Fauna Schaden zufügen.

**Phase (2): Winterbetrieb = Steuerung abhängig von Schmutzstoff-Frachteinträgen**

Hinweis: In den Wintermonaten verfügt der Bachlauf in der Regel über eine niedrigere Temperatur und führt eine größere Menge Wasser als in den Sommermonaten.

Konzentrationsspitzen können daher im Winter besser verarbeitet und abgebaut werden als im Sommer. Dennoch können größere Mengen eines Schmutzstoffes zu Schäden im Bachlauf führen. Für den Winterbetrieb ist eine Schmutzstoff-Fracht-Regelung vorgesehen um den Bachlauf vor größeren Schmutzstoffmengen aus dem Kanal zu schützen.

Für das Regelungskonzept, dass im Einzugsgebiet der Kläranlage Homburg-Bröl zum Einsatz kommt, wird auf Ammoniumstickstoff besonderen Wert gelegt, denn die Kläranlage und das Kanalnetz entlasten in den Brölbach – ein Salmoniden-Laich-Gewässer (siehe Abbildung 194).

Die Entlastung von RÜB mit nur unzureichend behandeltem Abwasser stellt eine Gefahr durch einen möglichen Eintrag von Ammoniak ins Gewässer dar. Das Ziel, das Gewässer zu schützen, hat höchste Priorität. Daher sollte eine hohe Belastung durch die Entlastung aus dem Kanalnetz verhindert werden.

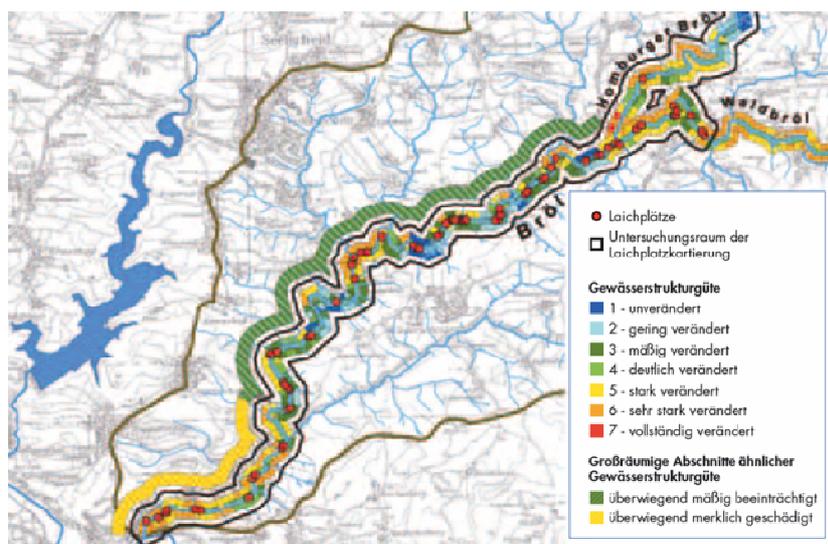


Abbildung 194: Laichplatzdichte in Abhängigkeit der Gewässerstruktur [Bröl-Leitfaden NRW]

Für Deutschland werden unterschiedliche immissionsorientierte Grenzwerte für Ammoniak im Gewässer vorgegeben, abhängig von Dauer und Häufigkeit des Ereignisses.

Eine Übersicht der Werte ist Tabelle 16 zu entnehmen.

Tabelle 16: Amplituden-Kennwerte für Ammoniak (NH<sub>3</sub>-N) in Abhängigkeit von Dauer und Frequenz [BRÖL-LEITFADEN NRW]

Frequenz / Dauer	kurz (< 1 h)	mittel (1 bis 6 h)	lang (> 6 h)
selten (< 0,5 n/a)	0,20 mg/l	0,15 mg/l	0,10 mg/l
mittel (0,5 n/a bis 4 n/a)	0,15 mg/l	0,04 mg/l	0,02 mg/l
häufig (> 4 n/a bis 25 n/a)	0,10 mg/l	0,02 mg/l	0,004 mg/l

Als Basis-Kennwert für potenzielle Salmonidenlaichgewässer mit dem Bewirtschaftungsziel „Erhalt bzw. Etablierung eines selbst reproduzierenden Großsalmonidenbestandes“ wird ein Richtwert für Ammoniak-Konzentrationen durch die EG-Fischgewässerrichtlinie von 0,004 mg/l bei Salmonidengewässern empfohlen [BRÖL-LEITFADEN NRW]. Für Ereignisse mittlerer Häufigkeit bei einer Dauer > 6 Stunden wird ein Grenzwert von 0,02 mg/l festgelegt.

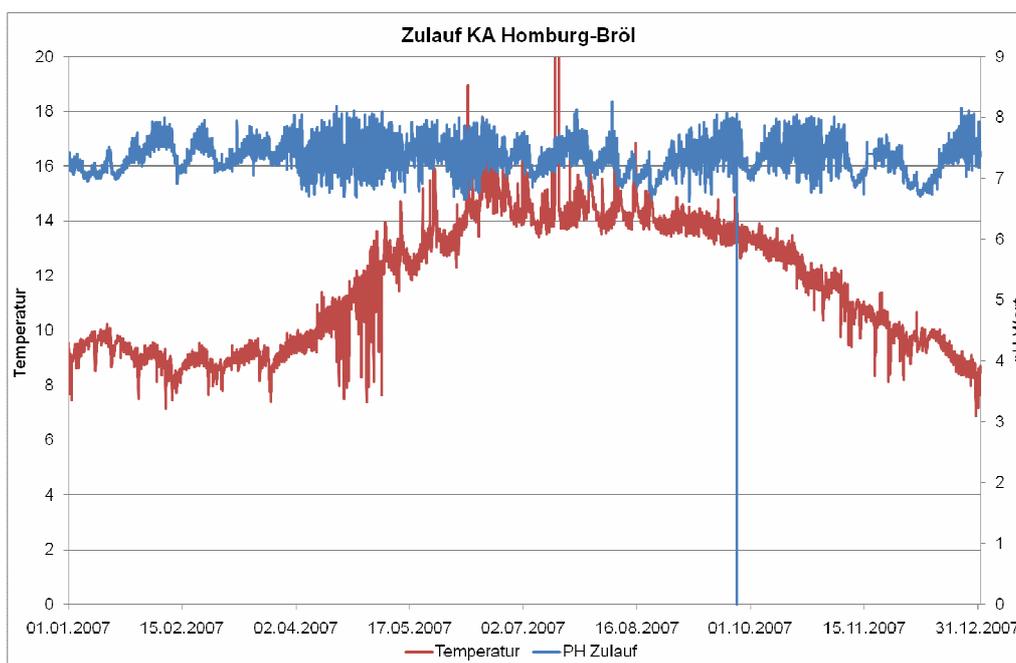
### 17.3 Stufe 2 - Sommer- und Winterbetrieb

Für die Gefahrenabschätzung einer Ammoniak-Bildung sind Ammoniumkonzentration im Zusammenhang mit Temperatur und pH-Wert entscheidend. Die Temperatur unterliegt im Kanalnetz (Tabelle 17) wie auch im Bachlauf einer natürlichen, jahreszeitlich abhängigen Schwankung.

**Tabelle 17: Durchschnitts-Werte aus dem Jahr 2007**

KA Zulauf	Jan	Feb	März	April	Mai	Juni	Juli	August	Sept	Okt	Nov	Dez
Temperatur	9,3	8,8	9,0	10,5	12,8	14,6	16,3	14,3	13,8	12,6	10,5	9,3
pH-Wert	7,2	7,5	7,4	7,3	7,4	7,4	7,4	7,1	7,4	7,4	7,3	7,2

In Abbildung 195 ist im Verlauf der Wassertemperaturen im Zulauf der KA Homburg-Bröl ein deutlicher Anstieg im April und ein Abfall im Oktober zu erkennen.



**Abbildung 195: Jahresverlauf von Temperatur und pH-Wert am Zulauf der KA Homburg-Bröl**

Der pH-Wert im Zulauf der KA liegt im Durchschnitt zwischen 7,1 und 7,5. Es können jedoch auch Spitzenwerte von bis zu 8,2 auftreten. Er unterliegt keinem ausgeprägten Jahresverlauf, sondern eher tagesabhängigen Schwankungen wie in Abbildung 196 zu erkennen ist. Der pH-Wert ist daher kein Gewichtungsfaktor für den Sommer-/Winterbetrieb.

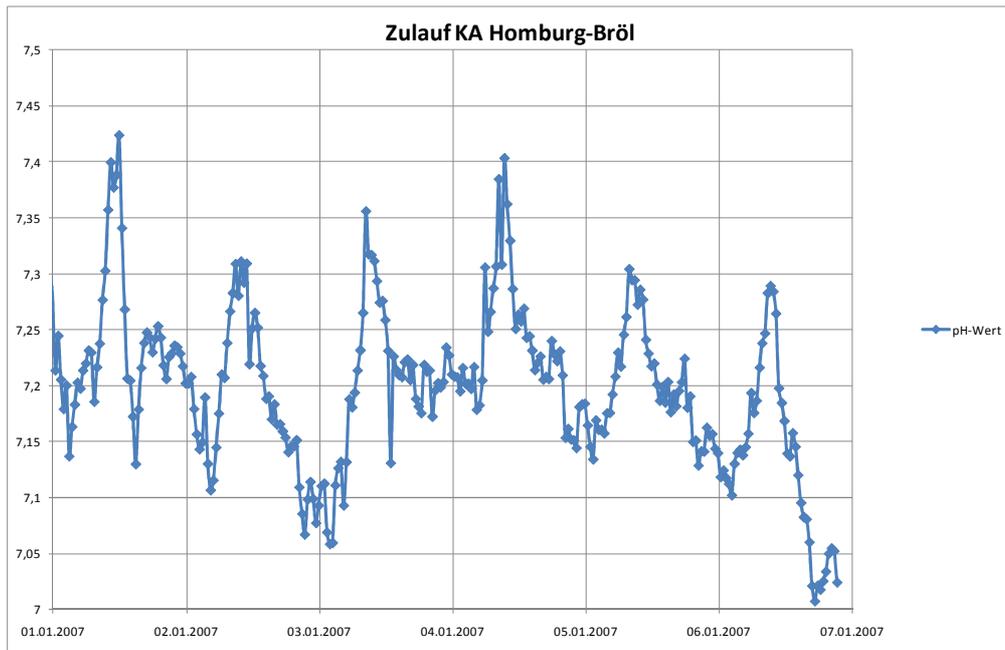


Abbildung 196: Verlauf des pH-Wertes über eine Woche

Ein weiterer Einflussfaktor für den Sommer- und Winterbetrieb ist die jahreszeitliche Belastung und der damit verbundene Sauerstoffgehalt im Brölbach (Abbildung 197) und seinen Zuläufen. Dabei sinkt mit steigender Sonneneinstrahlung und damit zunehmendem Pflanzenwuchs der Sauerstoffgehalt. Weiterhin steigt gleichzeitig die Gefahr der Ammoniak Bildung.

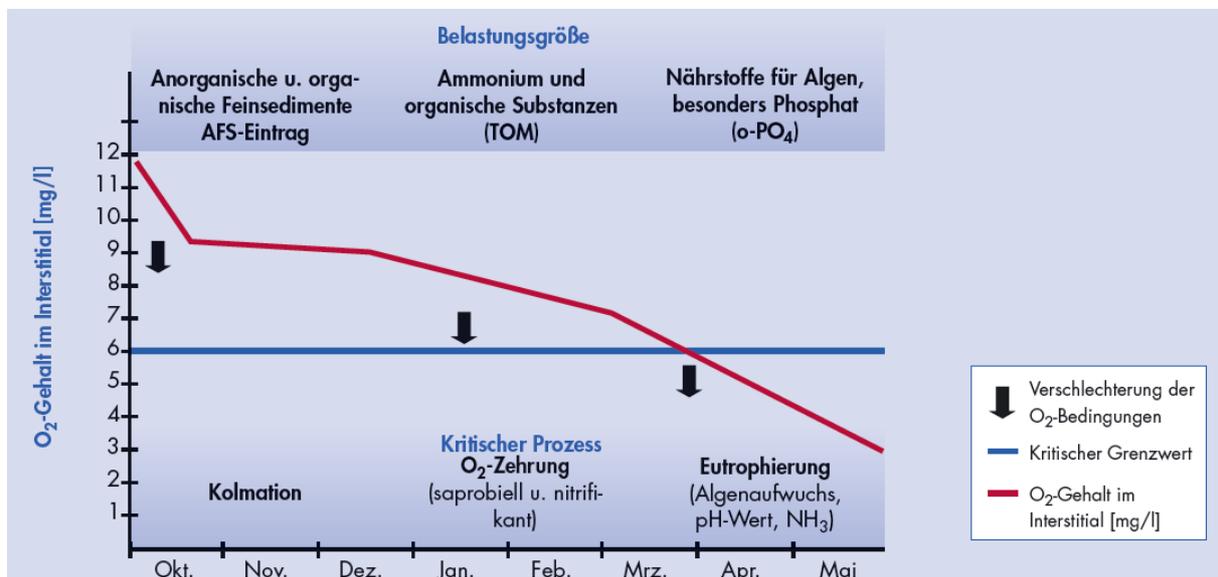


Abbildung 197: Stark vereinfachtes Schema zum kritischen Verlauf des Sauerstoffgehalts im Interstitial während der Ei- und Larval-Entwicklungsphase der Salmoniden; die Prozesse laufen auch parallel ab – dargestellt sind hier nur zeitliche Schwerpunkte [BRÖL-LEITFADEN NRW]

Für die schmutzstoffabhängige Regelung werden auf Grund der Wassertemperatur und der jahreszeitlich bedingten Belastungen des Gewässers ein Sommerbetrieb von Mai bis September und ein Winterbetrieb von Oktober bis April festgelegt.

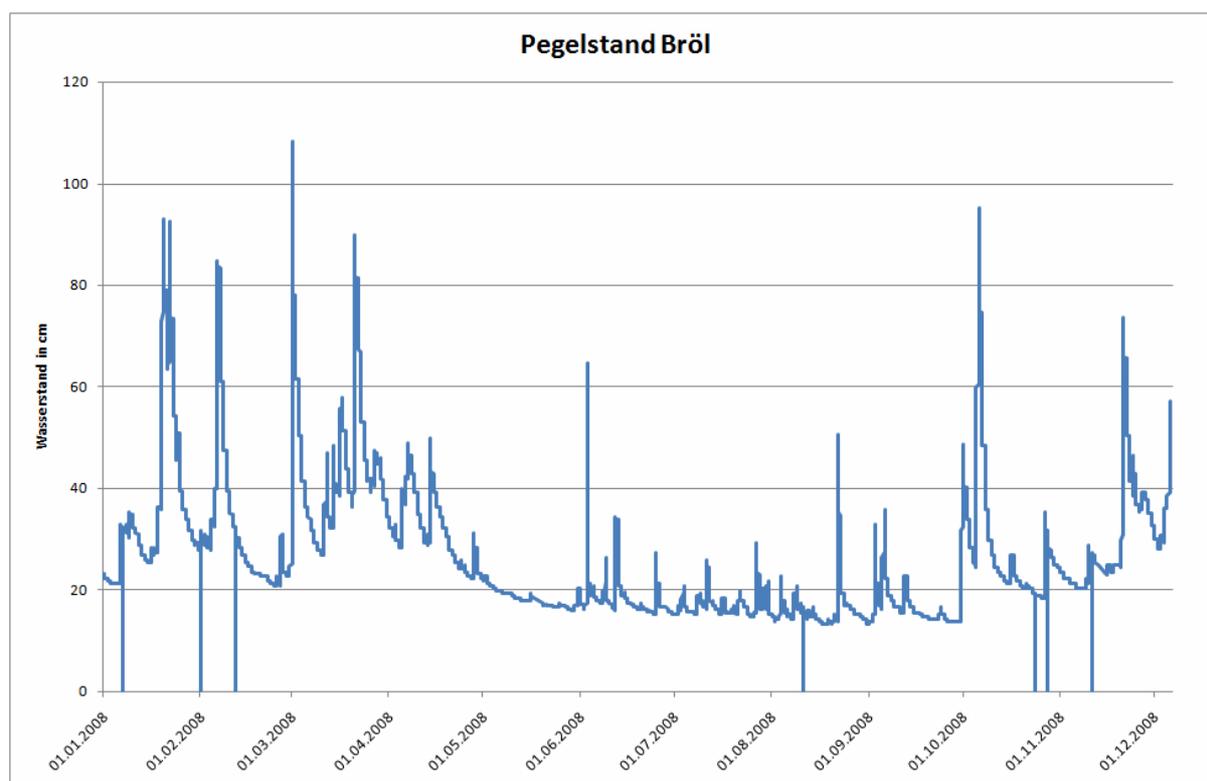
Darüber hinaus werden zwei Online-Messwerte den Zustand Winter und Sommer verifizieren. Dafür werden die Parameter „Temperatur“ im Zulauf der KA und der „Wasser-Pegelstand“ der Bröl unterhalb der KA Homburg-Bröl, an der Stelle Bröleck, eingesetzt.

Dabei wird für die Temperatur ein Schwellwert von 12°C und für den Pegelstand von 20 cm festgelegt. Für den Fall, es liegt z.B. ein warmer Wintermonat vor und die Temperatur liegt oberhalb von 12°C und der Pegel unterhalb von 20 cm, dann wird auf Sommerbetrieb umgeschaltet.

Die Ermittlung der Werte erfolgt über einen gleitenden Mittelwert von 3 Tagen. Die Mittelwertbildung über 3 Tage soll ein zu häufiges Umschalten der Zustände verhindern und kleinere Ereignisse, wie einen kurzen Sommerregen, relativieren.

### 17.3.1 Sommerbetrieb - Gewässerorientierte Steuerung abhängig von Konzentrationsspitzen

Im Sommerbetrieb zielt die Regelung auf die Vermeidung von Konzentrationsspitzen aus der Entlastung in den Bachlauf. Im Sommer - Mai bis September - führt der Brölbach in der Regel weniger Wasser als in den Wintermonaten (Abbildung 198).



**Abbildung 198: Wasserstand von Januar bis Dezember 2008 im Brölbach am Messort Bröleck**

Kurzfristige Konzentrationsspitzen im Sommer können aufgrund einer geringen Verdünnung der im Bachlauf vorhandenen Fauna empfindlichen Schaden zufügen. Daher sind besonders Entlastungen an Regenüberlaufbecken ohne angeschlossenes Regenrückhaltebecken zu reduzieren, da in diesem Fall eine Konzentrationsspitze direkt im angeschlossenen Brölbach bzw. seinen Zuflüssen Breidenbacher Bach und Ölsbach wirksam wird.

RRB „puffern“ eine Ammoniumspitze durch die hydraulische Durchmischung und die dort stattfindenden Abbauprozesse ab.

Für das Kanalnetz Homburg-Bröl bedeutet dies den Schutz des Gewässers an dem Becken Kalkofen im Strang Waldbröl und dem Becken Sängersheim sowie dem RÜB auf der Kläranlage im Strang Nümbrecht (Abbildung 199). Hinzu kommt, dass die genannten Becken die geographisch nächstgelegenen Becken zu den Salmoniden-Laichplätzen sind, die in Fließrichtung unterhalb der Kläranlage beginnen.

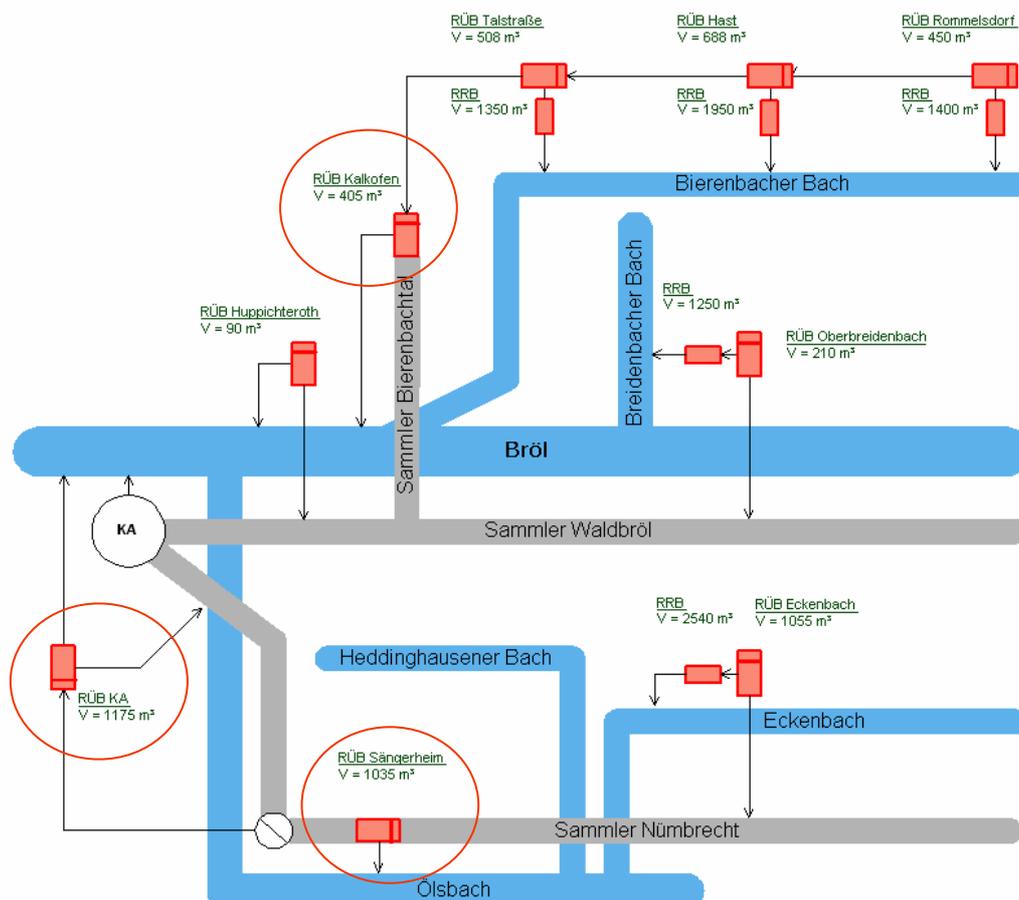


Abbildung 199: Sommerbetrieb in Stufe 2 – Bach wird an den gekennzeichneten RÜB geschützt

### 17.3.2 Winterbetrieb - Steuerung abhängig von Schmutzstoff-Frachteinträgen

Die von Schmutzstoff-Frachteinträgen abhängige Steuerung ist in den Wintermonaten von Oktober bis April aktiv. Dies ist auch der Zeitraum in dem das Lachslaichgewässer besonders zu schützen ist, da die Lachse zu Beginn dieses Zeitraums zum laichen in die Bröl zurückkehren und ihre Eier ins Interstitial ablegen. Die Eier verbleiben dort bis zum Aufschwimmen der Junglachse im April/Mai.

Im Winter befinden sich in der Regel größere Wassermengen im Gewässer, so dass meist eine stärkere Verdünnung von Schmutzfrachten vorliegt. Weil die Temperatur in dieser Zeit niedrig ist (unter 16°C) und der pH-Wert unter 8,5 liegt, kann auch die Gefahr von toxischen Ammoniakkonzentrationen als gering eingestuft werden. Bei pH-Werten unter 8,5 liegt der relative Ammoniak-Anteil unter 20% (bei Wassertemperaturen < 20 °C); Ammonium setzt sich in Abhängigkeit von pH-Wert und Temperatur in das stark fisch-toxische Ammoniak um [EMERSON et al. 1975].

Dennoch können größere Schmutzstoffeinträge aus dem Kanalnetz zu Schäden im Bachlauf führen, da die mechanische Verstopfung des Lückensystems im Interstitial die Emergenz der Lachsbrut behindert<sup>58</sup>. Für den Winterbetrieb ist eine Schmutzstoff-Frachtregelung vorgesehen, um den Bachlauf vor Immissionen aus dem Kanal zu schützen.

Für die frachtabhängige Ammoniumstickstoff-Regelung im Winterbetrieb wird über den Zeitraum von 2006 bis 2011 eine NH<sub>4</sub>-N- und CSB-Konzentration in der Entlastung an jedem RÜB ermittelt (Tabelle 18 und Tabelle 19). Die zugrunde gelegten Messdaten sind Werte aus 5 Minuten-Mischproben.

Des Weiteren werden die entlasteten Mischwassermengen aus den Jahren 2005 bis 2007 für jedes einzelne RÜB aufsummiert. Die entlasteten Mischwassermengen multipliziert mit der Ammoniumstickstoff-Konzentration ergibt eine Frachtmenge (Tabelle 20 und Tabelle 21). Diese Fracht steht für eine immissionsorientierte Belastung, die von jedem RÜB ausgeht.

**Tabelle 18: Ammoniumstickstoff-Konzentrationen aus den Jahren 2006 bis 2011**

Zeitraum 2006-2011							
Messungen in der Entlastung (5 Minuten Mischproben) in mg/l							
RÜB	RÜB Kalkofen	RÜB Talstraße	RÜB Hast	RÜB Rommelsdorf	RÜB KA	RÜB Sängenheim	RÜB Eckenbach
Konzentration NH <sub>4</sub> -N (85 % Perzentil)	3,54	2,99	3,34	1,88	3,94	3,77	4,08

**Tabelle 19: CSB-Konzentrationen aus den Jahren 2006 bis 2011**

Zeitraum 2006-2011							
Messungen in der Entlastung (5 Minuten Mischproben) in mg/l							
RÜB	RÜB Kalkofen	RÜB Talstraße	RÜB Hast	RÜB Rommelsdorf	RÜB KA	RÜB Sängenheim	RÜB Eckenbach
Konzentration CSB (85 % Perzentil)	38,18	69,74	71,30	44,55	65,00	75,68	74,30

**Tabelle 20: Entlastungen und Frachten im Strang Waldbröl von 2005 bis 2007**

Strang Waldbröl			
	RÜB Kalkofen	RÜB Talstraße	RÜB Rommelsdorf

<sup>58</sup> Quelle: Leitfaden zur wasserwirtschaftlich ökologischen Sanierung von Salmonidenlaichgewässern in NRW

Entlastung	[m <sup>3</sup> ]	Häufigkeit						
Menge 2005:	70.374	19	96.039	40	60.466	263	-	0
Menge 2006:	48.943	6	355.274	61	133.874	238	18.193	2
Menge 2007:	11.116	84	303.593	70	408.845	264	47.861	35
<b>Summe Entlastung:</b>	<b>130.433</b>	<b>109</b>	<b>754.906</b>	<b>171</b>	<b>603.185</b>	<b>765</b>	<b>66.054</b>	<b>37</b>
Arithm. Mittelwert	43.478	36	251.635	57	201.062	255	22.018	12
<b>Fracht gesamt NH<sub>4</sub>-N</b>	<b>462 kg</b>		<b>2.257 kg</b>		<b>2.015 kg</b>		<b>124 kg</b>	
<b>Fracht gesamt CSB</b>	<b>4.980 kg</b>		<b>52.647 kg</b>		<b>43.009 kg</b>		<b>2.943 kg</b>	

Tabelle 21: Entlastungen und Frachten im Strang Nümbrecht von 2005 bis 2007

Strang Nümbrecht	RÜB KA		RÜB Sägerheim		RÜB Eckenbach	
Entlastung	[m <sup>3</sup> ]	Häufigkeit	[m <sup>3</sup> ]	Häufigkeit	[m <sup>3</sup> ]	Häufigkeit
Menge 2005:	73.796	154	32.666	165	10.102	34
Menge 2006:	88.681	66	25.453	240	40.079	26
Menge 2007:	253.695	55	92.013	401	188.563	51
<b>Summe Entlastung:</b>	<b>416.172</b>	<b>275</b>	<b>150.132</b>	<b>806</b>	<b>238.744</b>	<b>111</b>
Arithmetischer Mittelwert	138.724	92	50.044	269	79.581	37
<b>Fracht gesamt NH<sub>4</sub>-N</b>	<b>1.640 kg</b>		<b>566 kg</b>		<b>974 kg</b>	
<b>Fracht gesamt CSB</b>	<b>27.051 kg</b>		<b>11.362 kg</b>		<b>17.739 kg</b>	

Im Strang Waldbröl zeigen sich bei den RÜB Talstraße und Hast die deutlich höchsten NH<sub>4</sub>-N Frachtmengen. Die Einleitungsstellen der RÜB in den Bierenbacher Bach liegen geografisch sehr nah beieinander. Um den Bachlauf an dieser Stelle vor einem größeren Immissionseintrag zu schützen, sollten bei der Steuerung abhängig von Schmutzstoff-Frachteinträgen diese beiden Becken in der Regelungsstrategie bevorzugt werden und an diesen Stellen die Entlastungsmengen reduziert werden.

Im Strang Nümbrecht ist das Gewässer am Regenüberlaufbecken auf der Kläranlage zu schützen. Dieses Becken weist die höchsten Frachtmengen in diesem Strang auf und liegt zudem auch geographisch dem Salmonidenlaich am nächsten. Daher ist die Entlastungsmenge des RÜB KA bei der Steuerung abhängig von Schmutzstoff-Frachteinträgen zu reduzieren.

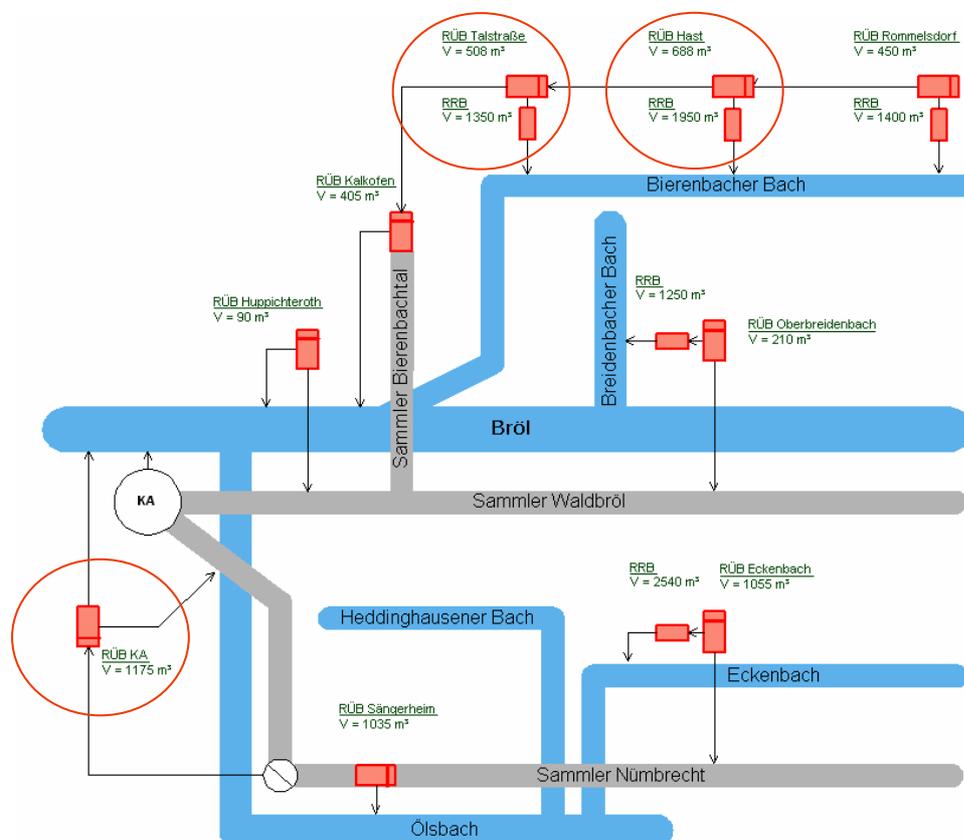


Abbildung 200: Winterbetrieb in Stufe 2 – Stellen an denen das Gewässer zu schützenden ist

In der Abbildung 200 sind die drei Becken gekennzeichnet, an denen das Gewässer in der frachtabhängigen Regelung zu schützen ist. Es handelt sich dabei um die Becken KA, Talstraße und Hast.

### 17.3.3 Der Zustandsgenerator für Stufe 2

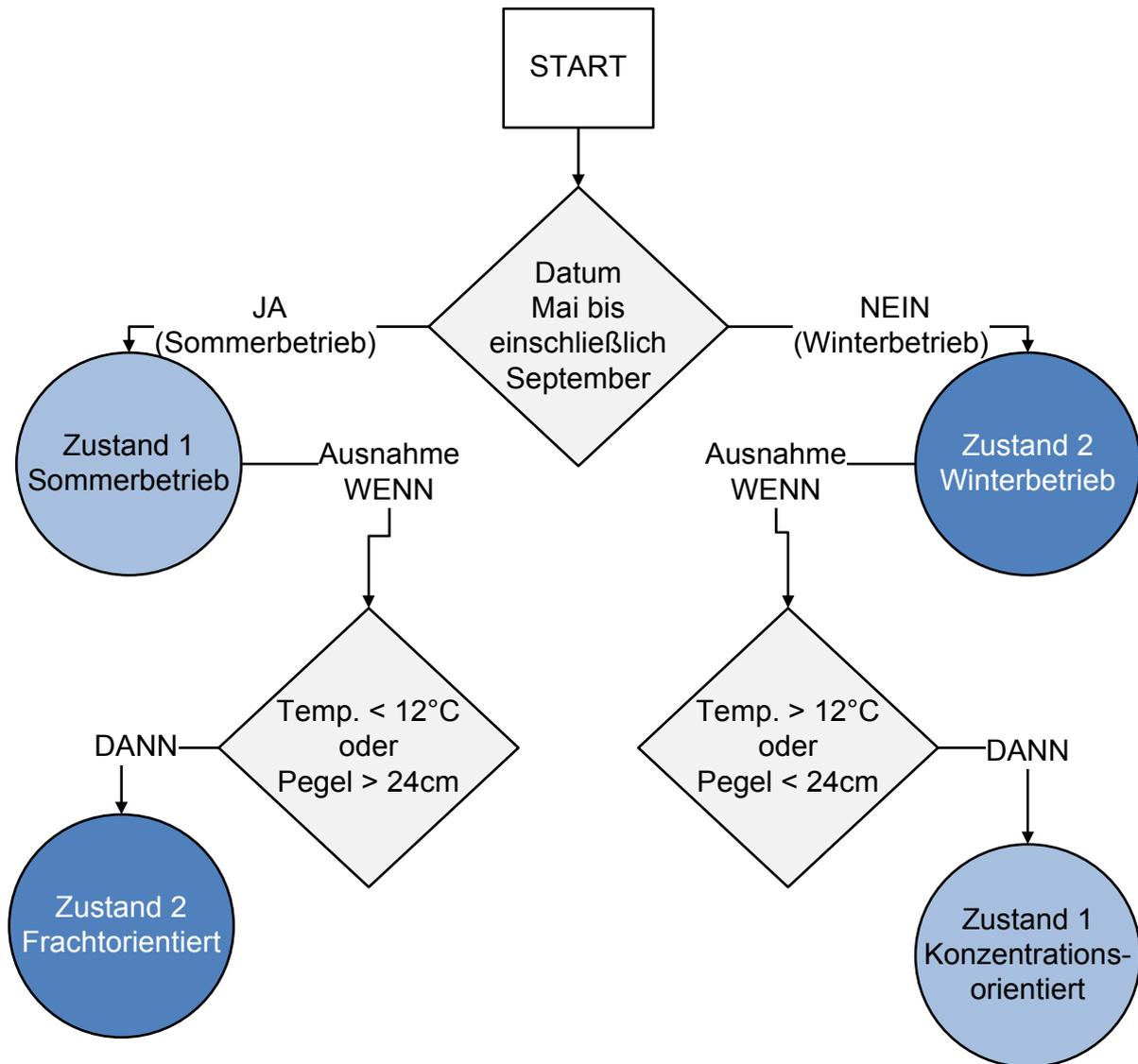
Die Zuordnung in Sommer- oder Winterbetrieb für Stufe 2 erfolgt mittels eines Zustandsgenerators, dessen Funktionsweise aus der Abbildung 201 hervorgeht. Anzumerken ist an dieser Stelle, dass der Zustandsgenerator aus Stufe 1 (siehe Kapitel 9.1), zur Bestimmung der hydraulischen Kanalnetzbelastung, auch in Stufe 2 weiterhin aktiv ist.

Die zwei Grundbetriebsstufen 1+2, der Sommer und Winterbetrieb, kommen abhängig von der kalendarischen Jahreszeit mit einer zusätzlichen Sicherheitsabfrage von zwei Sommer- bzw. Winterabhängigen Parametern zum Einsatz.

Im Zustandsgenerator erfolgt zuerst die Prüfung des Datums. Für die Monate Mai bis einschließlich September wird der Regler auf Sommerbetrieb geschaltet. Parallel dazu erfolgt die oben beschriebene Mittelwertbildung über 3 Tage der Wassertemperatur im Belebungsbecken der KA Homburg-Bröl und des Pegelstandes. Sinkt im Sommerbetrieb der Mittelwert der Temperatur unter 12°C oder steigt der Mittelwert des Pegelstandes über 24 cm, dann wird auf Winterbetrieb umgeschaltet.

Genau umgekehrt verhält es sich im Winterbetrieb: Für die Monate Oktober bis einschließlich April läuft der Regler im Winterbetrieb, es sei denn, der Mittelwert der Temperatur steigt über 12°C oder der Mittelwert des Pegelstandes sinkt unter 24 cm, dann wird auf Sommerbetrieb umgeschaltet.

## Zustandsgenerator Stufe 2 Konzentration/Fracht Optimierung



**Hinweise:**

- Datum = Lachslaichzeit ist von November bis April
- Temp. = Belebung KA Homburg-Bröl
- Pegel = Pegelstand Bröl am Bröleck hinter der Kläranlage
- Messwerte = gleitender Mittelwert über 30 Minuten und Ausreißer-Erkennung
- Umschaltung = Sommer-/Winterbetrieb mit ½ Tag Verzögerung
- Plausibilität = Temperatur muss zwischen 7°C und 18°C liegen
- Zustand 1 = Gewässerorientiert – Schutz des Gewässers an den Becken Kalkofen, Sängerheim und KA - (Becken ohne RRB)
- Zustand 2 = Frachtorientiert – Schutz des Gewässers an den Becken Hast, Talstraße und KA - (Becken mit hohen Frachten)

Abbildung 201: Zustandsgenerator für Sommer- u. Winterbetrieb im Kanalnetz Homburg-Bröl

### 17.3.4 Die Fuzzy-Regler für Stufe 2

Das Regelungskonzept wird wie beim rein hydraulischen Regler in Stufe 1 mittels Fuzzy-Regler umgesetzt. Die schon vorhandenen Einstellungen werden als Basis für den Sommer- und Winterbetrieb genommen und an den Becken, an denen das Gewässer zu schützen ist, im jeweiligen Betriebszustand (fracht- bzw. konzentrationsabhängig) verändert. Grundsätzlich wird die Entlastungswassermenge bei den RÜB reduziert, die in der Vergangenheit durch hohe Konzentrationen aufgefallen sind bzw. die nahe den Laichplätzen liegen. Zum Ausgleich wird an unproblematischen Stellen vermehrt entlastet. Die Umsetzung erfolgt auf zweierlei Weise: Zum Ersten werden die Fuzzy-Regeln angepasst und zum Zweiten werden die Fuzzy-Sets verschoben bzw. anders gewichtet.

#### 17.3.4.1 Anpassung der Regeln

In den Regeln wird festgelegt wie die Drosselwassermenge - abhängig von den Füllständen der Becken - eingestellt werden soll. Diese Regeln sind als „Wenn-Dann-Anweisungen“ formuliert. Grundsätzlich soll die Drosselwassermenge eines Beckens, dessen Eingang „Füllstand hoch“ angibt, „hoch“ eingestellt sein, so dass das Wasser abfließen kann und eine Entlastung hier vermieden wird. Lautet der Eingang eines Beckens „Füllstand niedrig“ soll die Drosselwassermenge „niedrig“ eingestellt sein, da das Potential des Beckens voll ausgeschöpft werden soll. Im Kanalnetz geschieht dies unter Berücksichtigung der Füllstände der anderen Becken, so dass die „Wenn-Dann-Anweisungen“ entsprechend komplexer werden. Sie müssen dann durch „Und-Verknüpfungen“ ergänzt werden, wie das folgende Beispiel zeigt:

„**WENN** gilt: Füllstand Becken 1 = *hoch* **und** Füllstand Becken 2 = *niedrig*, **DANN** soll für die Drosselwassermenge von Becken 1 gelten: Drosseleinstellung = *hoch*“.

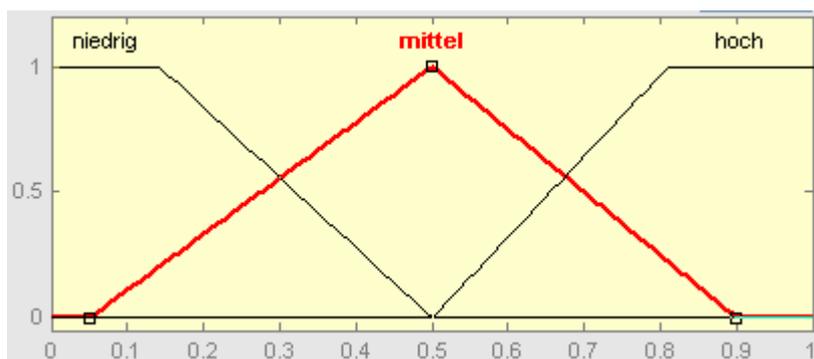
Für den Eingang „Füllstand mittel“ ist es beim hydraulischen Regler sinnvoll die Drosselwassermenge des entsprechenden Beckens ebenfalls „hoch“ einzustellen, um eine gleichmäßige Verteilung des Wassers zu erzielen. Für den frachtabhängigen Regler mit Sommer- und Winterbetrieb bietet es sich jedoch an, hier Änderungen vorzunehmen. Die Drosselwassermengen der Becken an denen das Gewässer zu schützen ist, sollen bei eigenem Eingangswert „Füllstand mittel“ „hoch“ eingestellt sein, so dass das Wasser eher abfließen kann. Die Becken, die den zu schützenden Becken vorangehen, können beim Wert „Füllstand mittel“ noch Wasser zurückhalten, damit weniger Wasser den kommenden Becken zugeführt wird. Dementsprechend können hier die Drosselwassermengen für den Eingang „Füllstand mittel“ „niedrig“ eingestellt werden. Auch hier werden die anderen Becken durch „Und-Verknüpfungen“ berücksichtigt.

#### 17.3.4.2 Anpassung der Sets

Die Eingangssets sind Dreiecks- oder Trapezfunktionen, die die Gewichtungen der Füllstände angeben. Das heißt, diese bestimmen ab wann der Füllstand eines Beckens als „hoch“ oder als „niedrig“ bewertet wird, je nachdem ob es sich um ein Becken handelt, an dem das Gewässer zu schützen ist oder nicht. Die Grenzen sind dabei nicht fest, sondern gehen wie bei Fuzzy-Reglern üblich ineinander über. Zur Einstellung der frachtabhängigen Sommer- und Winterregler werden auch hier Änderungen vorgenommen. Dies bedeutet, dass die Eingangssets der Becken, an denen das Gewässer zu schützen ist, in der Skala nach links verschoben werden, so dass die Füllstände nur kurzfristig als „niedrig“ und frühzeitig als „hoch“ bewertet werden. Bei den anderen Becken werden die Eingangssets entsprechend nach rechts verschoben, so dass die Füllstände bis zu einem höheren Level als „niedrig“ und

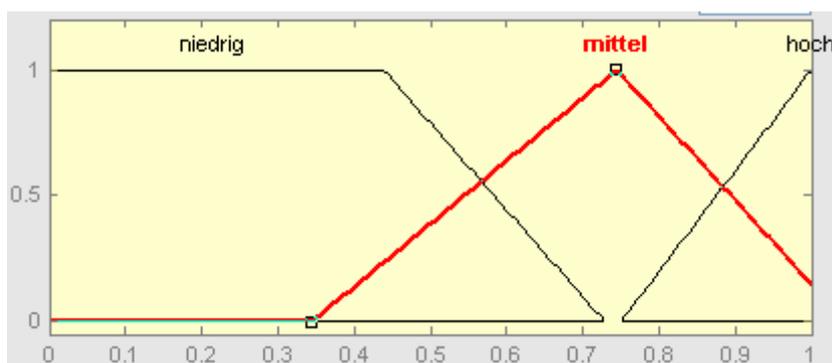
erst ab einem späteren Zeitpunkt als „hoch“ bewertet werden. Dadurch werden die Drosselwassermengen dieser Becken so eingestellt, dass sie mehr Wasser aufnehmen und dieses länger zum Schutz der anderen Becken zurückhalten.

Abbildung 202 zeigt ein Eingangsset für die Gewichtung der Füllstände eines Beckens beim hydraulisch vergleichmäßigen Regler. Die Eingänge, die den Füllstand „niedrig“, „mittel“ oder „hoch“ bewerten, sind gleichmäßig angeordnet. Dies gilt für alle Becken, so dass das Wasser im gesamten Kanalnetz möglichst gleichmäßig verteilt wird.



**Abbildung 202: Gewichtung des Beckenfüllstandes beim hydraulischen Regler mit Einstellung für gleichmäßige Verteilung**

Beim frachtorientierten Regler wird unterschieden zwischen den Becken an denen das Gewässer geschützt wird und Becken an denen das nicht der Fall ist. Dadurch erhalten die Becken im Kanalnetz differenzierte Eingangssets. Abbildung 203 zeigt ein solches Set eines Beckens, an dem das Gewässer nicht zu schützen ist. Dieses soll mehr Wasser aufnehmen. Der Füllstand wird daher länger als „niedrig“ bewertet.



**Abbildung 203: Gewichtung des Beckenfüllstandes eines nicht zu schützenden Beckens beim frachtabhängigen Regler**

Abbildung 204 zeigt die entsprechende Gewichtung eines Beckens, an einer zu schützenden Stelle des Gewässers. Der Füllstand wird früher als „hoch“ bewertet und damit nimmt es weniger Wasser auf, so dass es zur Kläranlage weitergeleitet wird.

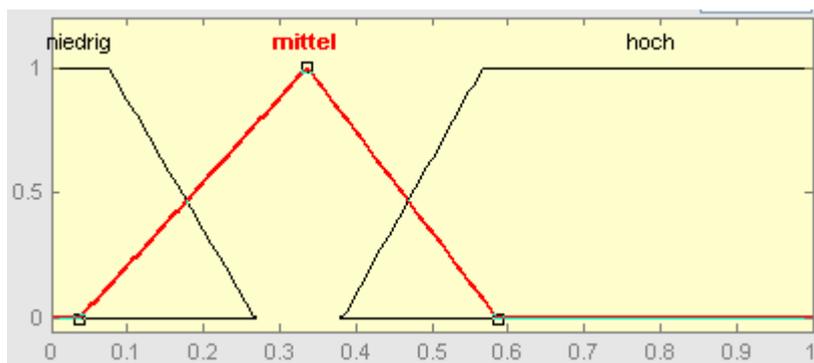


Abbildung 204: Gewichtung des Beckenfüllstandes eines Beckens, an einer zu schützenden Stelle des Gewässers, beim frachtabhängigen Regler

### 17.3.4.3 Auswirkung der veränderten Gewichtungen in Stufe 2

Für das fracht- und konzentrationsabhängige Regelungskonzept werden in den einzelnen FUZZY-Reglern die Gewichtungen wie beschrieben neu definiert. Die Regeln (WENN-DANN-Beziehungen) bleiben dabei erhalten. Mit den veränderten Gewichtungen werden neue Prioritäten mit Schutz auf bestimmte Gewässerabschnitte festgelegt.

Ein Beispiel für eine veränderte Gewichtung bzw. Zielsetzung zeigen die beiden folgenden Abbildungen. In der linken Grafik liegt die Priorität auf der gleichmäßigen Verteilung der Wassermengen auf die einzelnen Becken. Die Entlastungsmenge des Beckens 3 im unregulierten Zustand wird mit Regelung gleichmäßig auf die Becken 1 und 2 verteilt.

In der rechten Grafik liegt die Zielsetzung der Regelung auf dem Schutz des Gewässers am Becken 2. Die Regelung verfolgt die identischen Regeln, allerdings mit unterschiedlicher Gewichtung. Die Regeln werden so eingestellt, dass eine Entlastung an diesem Becken so lang wie möglich vermieden wird.

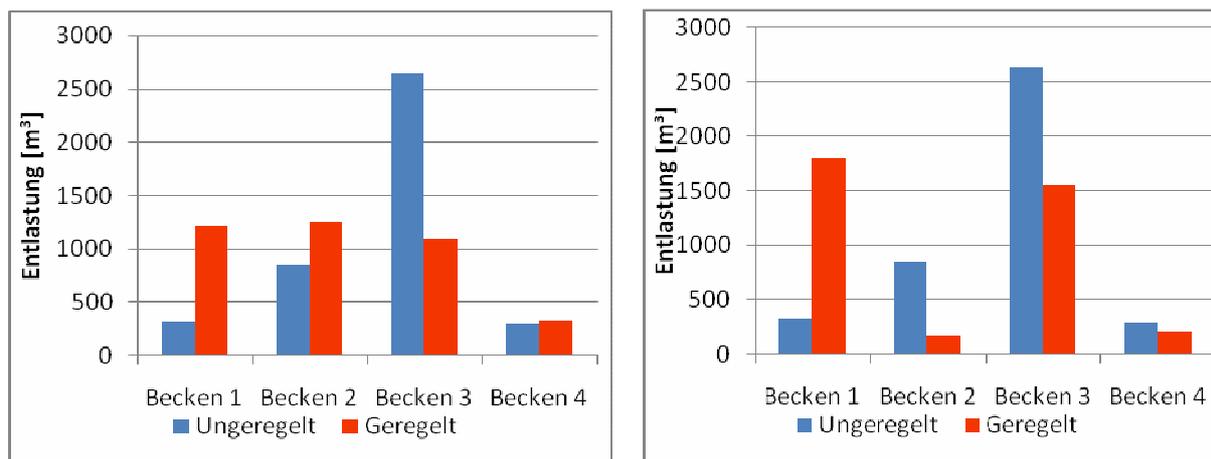


Abbildung 205 a+b: Entlastungsmengen in einem Kanalnetz-Strang mit unterschiedlichen Zielsetzungen bzw. Gewichtungen der FUZZY-Regeln

Dieses Beispiel zeigt die Einstellungsmöglichkeiten der Regelung durch unterschiedliche Gewichtungen und Zielsetzung. Die insgesamt entlastete Wassermenge ist bei diesen beiden Regelungsvarianten nahezu identisch (Unterschied von 3%).

## 17.4 Regler Stufe 3 – Regelung nach Online-Messungen

Stufe 3 kann nicht im gesamten Kanalnetz umgesetzt werden, sondern nur im Strang Waldbröl. Wegen der schwierigen Aufnahme von  $\text{NH}_4\text{-N}$ -Messdaten (siehe Kapitel 13) im Strang Nümbrecht wird im Betrieb mit Stufe 3 deshalb dort weiterhin nach Stufe 2. geregelt. Die Aufnahme von  $\text{NH}_4\text{-N}$ -Messdaten ist aufgrund baulicher Gegebenheiten nicht im Dauerbetrieb durchführbar.

Die Becken Rommelsdorf, Hast, Talstraße und Kalkofen werden in Stufe 3 abhängig von 3-Minuten Online-Messdaten geregelt. Überwacht werden dabei der Ammoniumstickstoff im Kanal, die Temperatur und der Füllstand der RÜB.

Für die Stufe 3 wird ein separates Sicherheitskonzept für die Messdatenüberwachung entwickelt, was die Plausibilität der Online-Daten überprüft. Bei Ausfall einer Messstelle wird das Regelungskonzept wieder in Stufe 2 schalten und den Betrieb von Stufe 3 erst wieder aufnehmen, wenn alle Online-Messdaten wieder zur Verfügung stehen.

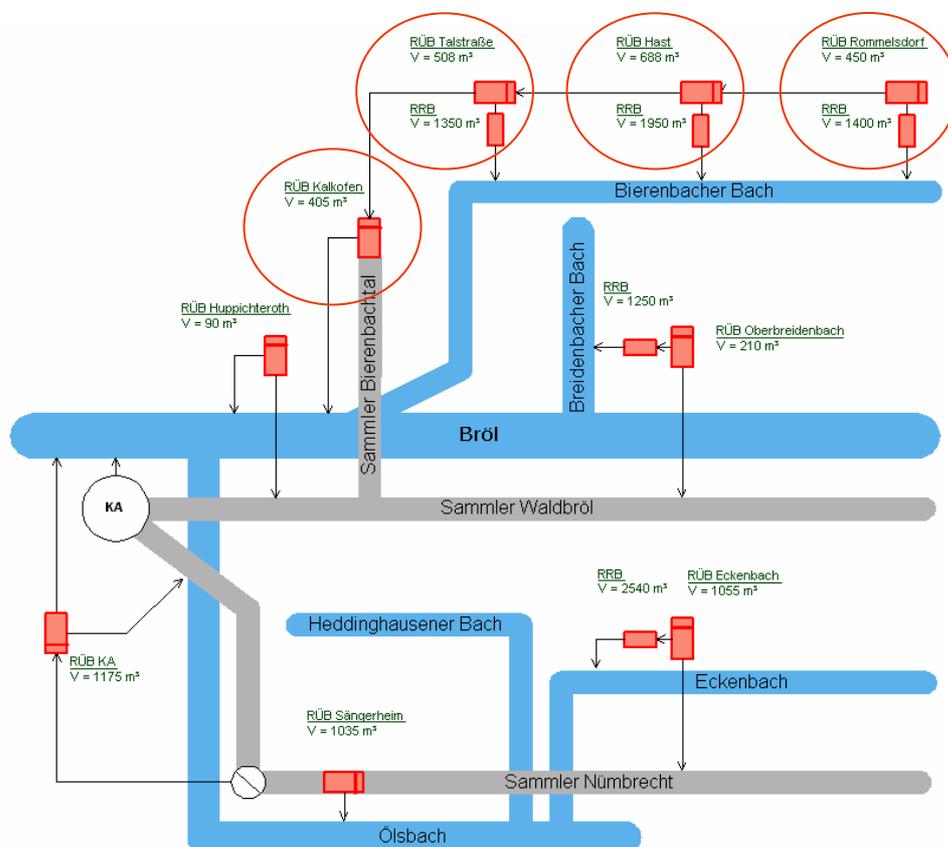


Abbildung 206: Stufe 3 wurde für RÜB Rommelsdorf, Hast, Talstraße und Kalkofen umgesetzt

### 17.4.1 Der Zustandsgenerator für Stufe 3

Der Zustandsgenerator, der bereits in Stufe 2 zum Einsatz kommt, wird für Stufe 3 erweitert. Dieser erweiterte Zustandsgenerator der Stufe 3 beginnt, wie in Stufe 2, mit den Zuständen 1 oder 2, die je nach Jahreszeit die Konzentrationsregelung im Sommer (Zustand 1) oder die Frachtregelung im Winter (Zustand 2) aktivieren. Ab einem Füllstand von 80 % in einem beliebigen Becken setzt der Zustand 3 ein, der die Konzentrationsregelung mit Online-Messungen (Stufe 3) aktiviert.

Der Zustandsgenerator von Stufe 2 bleibt für die frachtorientierte Optimierung des Kanalnetzes im Einsatz.

### Zustandsgenerator für Stufe 3 Kanalnetz Homburg-Bröl

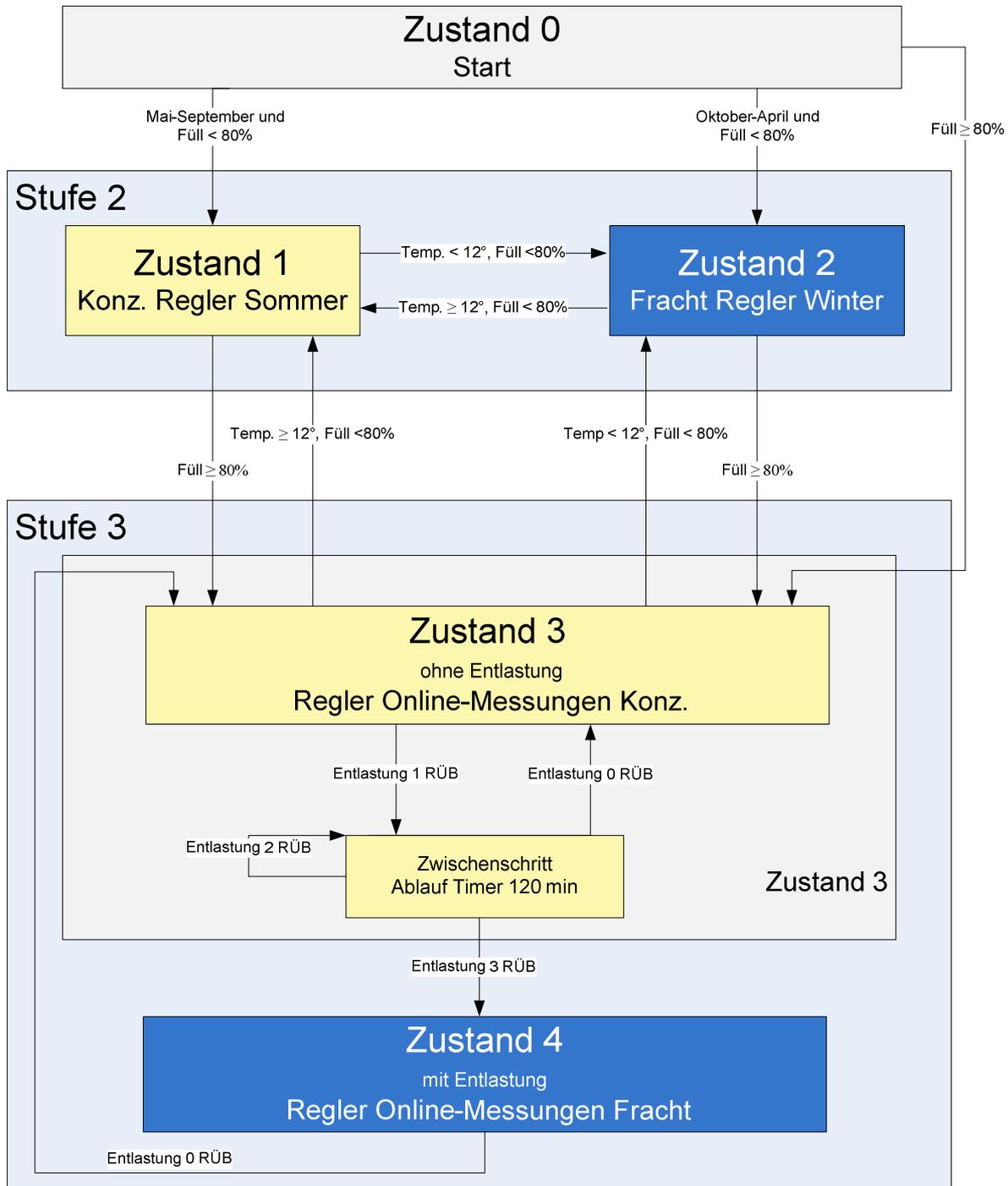


Abbildung 207: Fracht- und konzentrationsabhängige Regelung mit Online-Messwerten, erweiterter Zustandsautomat

Wenn zusätzlich ein Becken entlastet, schaltet der Zustandsautomat in einen Zwischenzustand und bleibt bei der Konzentrationsregelung mit Online-Messungen. Dabei läuft ein Timer, um nach 2 Stunden erneut die Entlastungen in den Becken zu prüfen. Entlastet nun kein Becken mehr, geht es zu-

rück in Zustand 3; entlastet weiterhin ein Becken oder entlasten zwei Becken, läuft der Timer erneut für 2 Stunden ab. Der Zustand 4 in der Stufe 3 - Frachtregelung mit Online-Messungen - kommt erst zum Einsatz wenn mindestens drei Becken in die Entlastung gehen. Solange dies nicht der Fall ist, bleibt die Regelung in Zustand 3. Dies ist sinnvoll für die Vergleichmäßigung der Frachtmengen ins Gewässer. Wenn bereits drei Becken entlasten sind die ersten Konzentrationsspitzen bereits durch das System gelaufen und es hat ein Art Verdünnungseffekt eingesetzt. Von diesem Zeitpunkt ist es wichtig den Frachtausstoß ins Gewässer zu vergleichmäßigen.

### 17.4.2 Umsetzung Stufe 3- Regelung nach Online-Messungen

Bei der Umsetzung und Optimierung von Stufe 3 wird wieder auf das Simulationsmodell zurückgegriffen. Grundsätzlich sollen die Messwerte für  $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentrationen aus dem Kanal des jeweiligen RÜB aufgenommen und daraus die Konzentration im Becken errechnet werden. Zu diesem Zweck wird das Modell um ein entsprechendes Umrechnungsmodul erweitert (Abbildung 208).

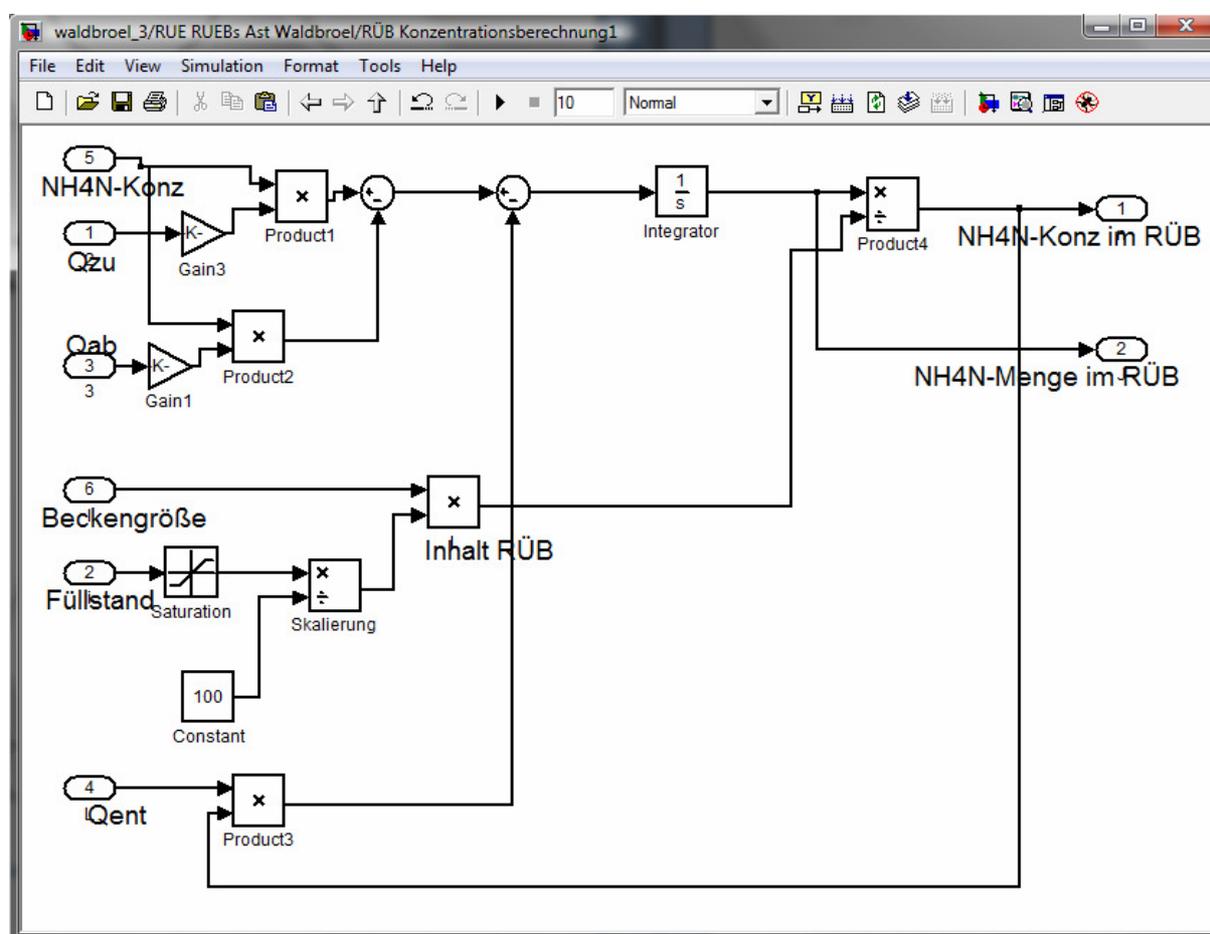


Abbildung 208: Modul Berechnung Konzentration im Becken

Als Eingangsgrößen in das Modul für die Frachtberechnung gehen folgende Daten ein:

- $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentration aus dem Ablauf des jeweiligen Beckens
- Durchfluss im Zulauf (Ablauf vorliegendes RÜB + Niederschlag + hydraulische Menge Einwohnerwerte)

- Durchfluss im Ablauf
- Beckengröße
- Füllstand des Beckens in Prozent
- Entlastung

Zur Reglerentwicklung wurden als Eingangsgrößen Simulationswerte aus dem Modell verwendet. Beim späteren Einsatz wurden Messdaten aus dem Kanal als Eingangswerte eingebunden.

Grundsätzlich funktioniert die Stufe 3 ähnlich wie die vorherigen: Entlastungen an Becken mit höheren Konzentrationen bzw. Frachten werden zurückgehalten und deren Entlastung verzögert.

## 17.5 Einbindung der Kläranlage in eine integrierte Kanalnetzsteuerung

Eine integrierte Verbundsteuerung sollte wichtige Faktoren wie den Niederschlag und Messdaten des Gewässers, des Kanalnetzes sowie der Kläranlage berücksichtigen.

Die Kläranlage Homburg-Bröl wird in die Gesamtuntersuchungen für KANNST mit einbezogen, simuliert und in Hinsicht auf ökonomische, ökologische und technische Aspekte ausgewertet und eingebunden.

### 17.5.1 Hydraulische Einbindung der KA

Auswertungen des Regelungskonzepts in Stufe 1 zeigen, dass die Entlastungen in den Teilsträngen Nümbrecht und Waldbröl noch durch eine Strangregelung an der Kläranlage reduziert werden können.

Die hydraulische Belastbarkeit der KA und die Kapazität des RÜB der Kläranlage können noch besser auf einander abgestimmt werden, wenn die Zuläufe aus den zwei Teilsträngen in Zusammenhang mit der Kläranlage geregelt werden.

Die Tatsache, dass die Einzugsgebiete des Strangs Waldbröl und des Strangs Nümbrecht unterschiedlich sind, führt zu unterschiedlichen Belastungen der beiden Stränge. Während Strang Nümbrecht noch hohe Wassermengen liefert, kann der Strang Waldbröl bereits deutlich unter seiner Maximalmenge von 252 l/s liegen. Dabei kann es vorkommen, dass im RÜB-Kläranlage eingestaut wird, obwohl die maximale Gesamtzulaufmenge der Kläranlage noch nicht erreicht ist.

Die neue Regelung errechnet nun das freie Potential aus dem Strang Waldbröl und addiert es dem Strang Nümbrecht auf. Daraus ergibt sich eine variable Zulaufmenge  $Q_{DN}$  für den Strang Nümbrecht:

$$Q_{DFP} = Q_{Dmax} - Q_{Dist}$$

$Q_{DFP}$  : Freies Potential Drosselmenge Waldbröl

$Q_{Dmax}$  : Maximale Drosselmenge Waldbröl

$Q_{Dist}$  : Drosselmenge Waldbröl ist

$$Q_{DN} = 85 \frac{l}{s} + Q_{DFP}$$

$Q_{DN}$  : Drosselmenge Nümbrecht

$Q_{DFP}$  : Freies Potential Drosselmenge Waldbröl

Der Zufluss vom Anlagengelände von 14 l/s wird in der Formel nicht betrachtet, da dieser von der Regelung nicht beeinflusst werden kann. Die Begrenzung der neuen Strangregelung ist immer die maximal zulässige Zulaufmenge zur Kläranlage von 351 l/s. Diese Zahl beinhaltet bereits den Zufluss vom Anlagengelände. Generell werden mit der neuen Regelung zwei Hauptziele verfolgt:

- Bessere Zulaufregelung im Regenfall
- Schnellere Entleerung des RÜB KA nach einem Regenereignis

Insbesondere der zweite Fall ist interessant, denn es bedeutet, wenn beide Stränge nur noch wenig Wasser führen, dass RÜB KA schneller geleert werden kann und so im Falle eines erneut einsetzenden Regens wieder freies Potential bietet. Zudem ist der Füllstand des RÜB Kläranlage eine Eingangsgröße des Kanalnetzreglers für die Drosselmengen der RÜB Sägerheim und Kalkofen. Die neue Regelung wirkt sich somit positiv auf die Regelung des gesamten Kanalnetzes aus.

### 17.5.2 Strangregelung

Im alten Ausbauzustand ist der Strang Waldbröl auf 200 l/s begrenzt. Dies wird über eine feste Schieberstellung ohne MID (magnetisch-induktive Durchflussmessung) eingestellt. Im Falle eines höheren Zuflusses, wird bis zum Trennbauwerk-Museum zurückgestaut und von dort Wasser in den Nümbrecht Strang geleitet. Die Zulaufmenge im Strang Nümbrecht ist über die Drossel am RÜB Kläranlage auf 85 l/s begrenzt. Wassermengen, die 85 l/s überschreiten werden in das RÜB Kläranlage geleitet. Hinzu kommt ein zusätzlicher Zulauf aus dem Strang Elsenroth, welcher der Anlage direkt zugeführt wird.

Bei einem Ausbau des Zulaufbauwerks wird ein MID im Zulauf Waldbröl installiert. Des Weiteren wird der Strang Elsenroth nun auch über das Zulaufbauwerk der Anlage zugeführt. Daraus ergibt sich eine neue Zulaufmenge für den Strang Waldbröl von 252 l/s, die Zulaufmenge für den Strang Nümbrecht ist 85 l/s. Hinzu kommen ca. 14 l/s aus dem Einzugsgebiet der Kläranlage.

Technisch ergibt sich daraus die Möglichkeit, die Regelung der Stränge im Zulauf mit der Regelung des Kanalnetzes zu verbinden und somit der Kläranlage größere Wassermengen zuzuführen. Folgende Abbildung zeigt schematisch die Zulaufsituation der KA Homburg-Bröl.

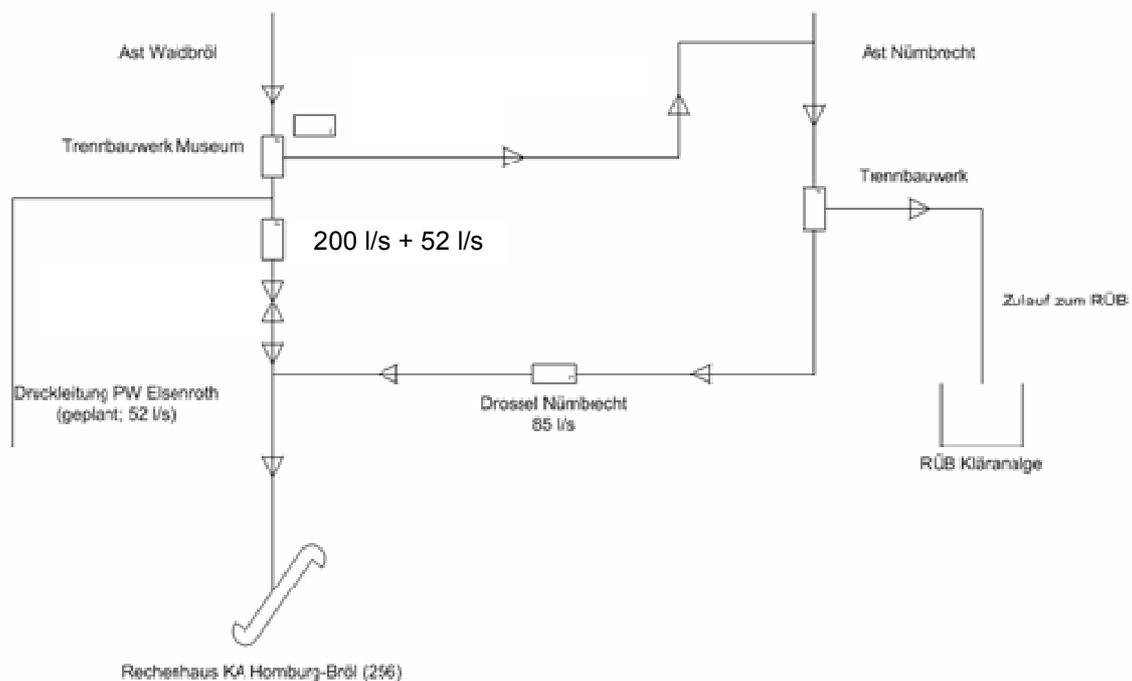


Abbildung 209: Strangregelung

Die Einbindung der Kläranlage in die integrierte Regelung erfolgte in Stufe 1, 2 und 3. Die folgenden beiden Grafiken verdeutlichen, dass die Kläranlage sehr gut in die Gesamtstrategie eingebunden wird und die hydraulische Belastbarkeit harmonisiert wird.

Die Abbildung 210 zeigt den Kläranlagenablauf von Homburg-Bröl für das Jahr 2006. Der maximale Kläranlagenzulauf liegt bei 351 l/s. Der Ablauf kann davon bis maximal 386 l/s abweichen, was sich aus 351 l/s Zulauf und 10% Messfehler zusammensetzt. An dieser Stelle wird der Ablauf und nicht der Zulauf der Kläranlage dargestellt, da es 2006 noch keine ausreichende und zusammenhängende Messung für den Zulauf gab.

### KA Homburg-Bröl Ablauf 2006

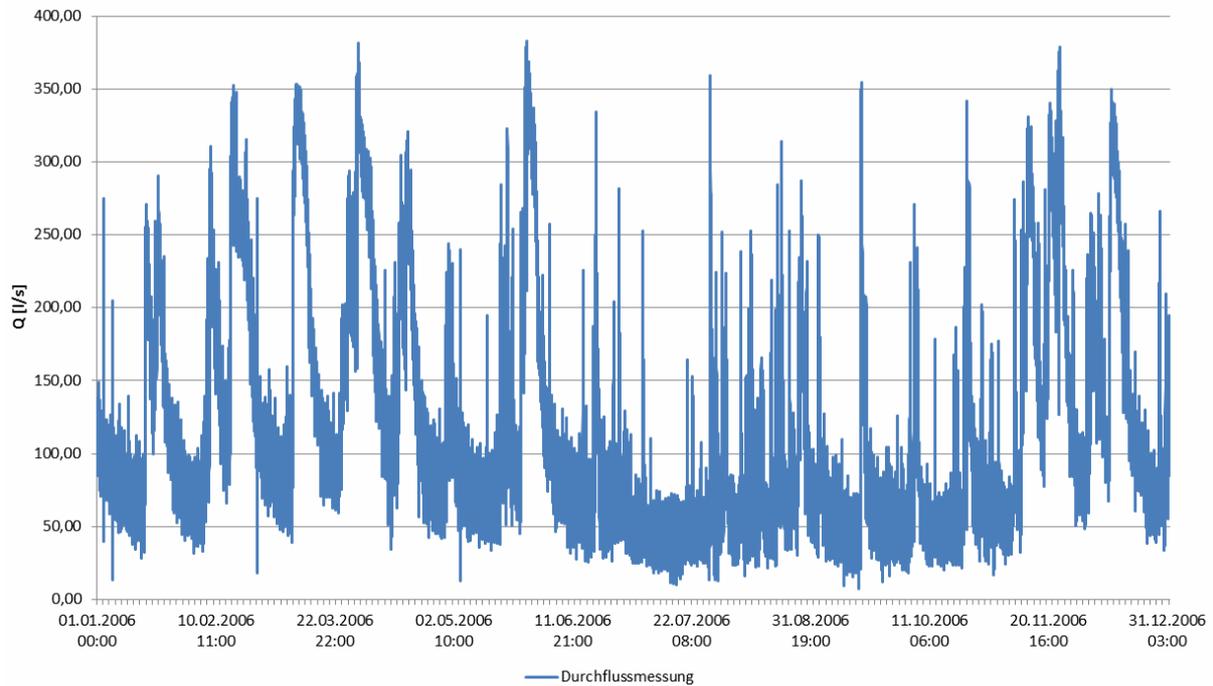


Abbildung 210: Ablauf KA Homburg-Bröl 2006, ohne integrierte Regelung

Abbildung 211 weist auch unter Einsatz der integrierten Regelung eine vergleichmäßigte hydraulische Belastung der Kläranlage auf. Denn trotz erhöhter Zulaufmengen zur KA wird der maximal zulässige Zufluss nicht überschritten.

### KA Homburg-Bröl Ablauf 2009

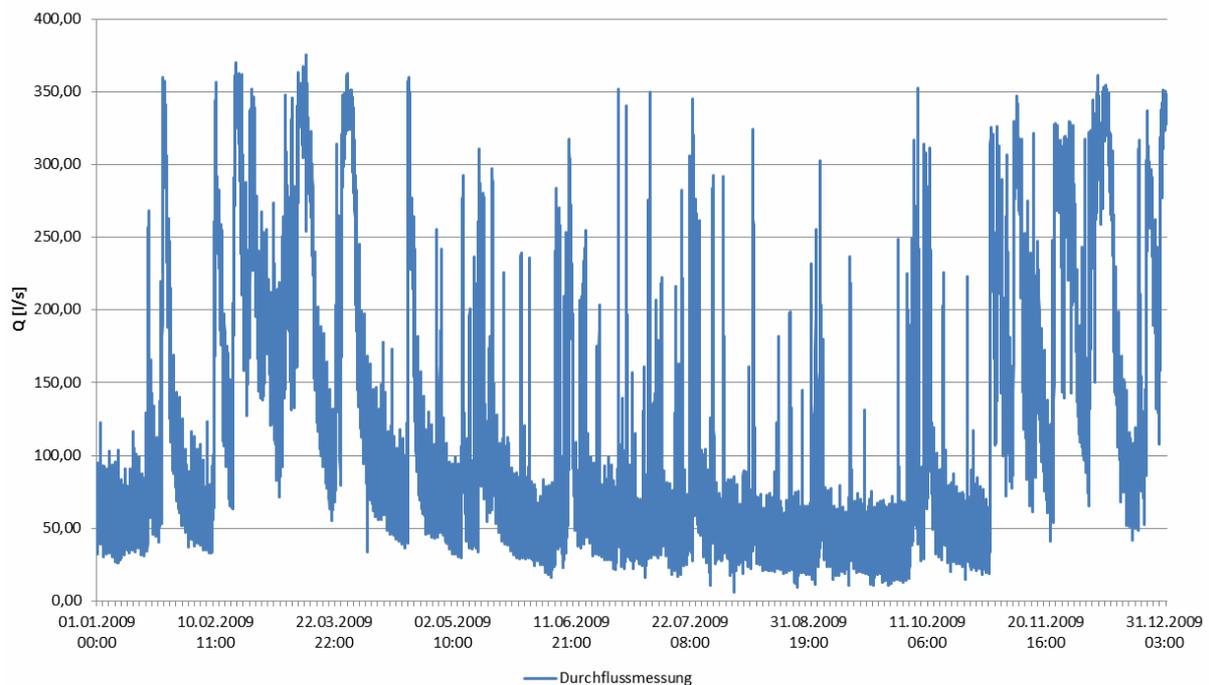


Abbildung 211: Ablauf KA Homburg-Bröl 2009, mit integrierter Regelung

Abbildung 212 zeigt außerdem den Verlauf und die Reduzierung der Entlastung am Becken KA bei einem Niederschlagsereignis im Oktober 2008. Durch die schnelle Entleerung des RÜB an der KA kann eine Entlastung am 01.10.08 von ca. 00:00 bis 23:00 Uhr vollständig verhindert werden.

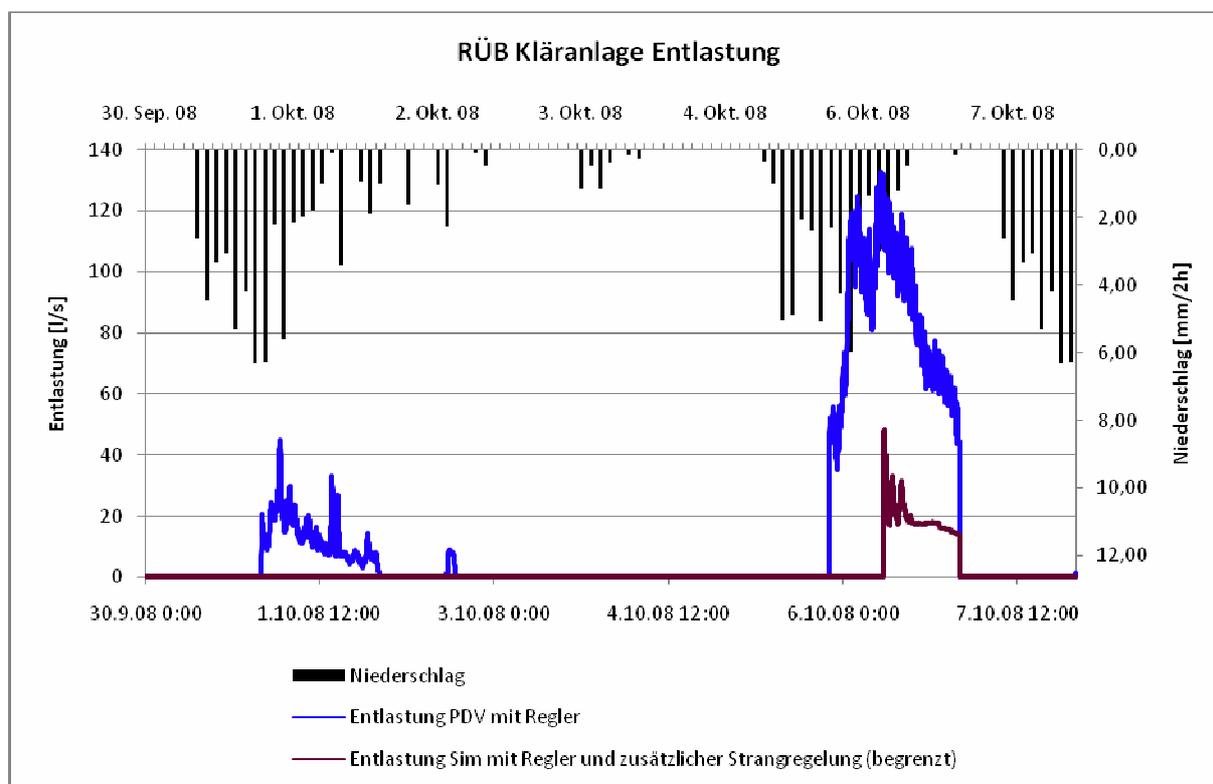


Abbildung 212: Entlastung RÜB KA 30.09-07.10.08 PDV und Simulation mit zusätzlicher Strangregelung (begrenzt)

### 17.5.3 Stoffliche Einbindung der KA

Um die Kläranlage sicher in das Gesamtkonzept einzubinden wird sie in einem Modell nachgebildet und für eventuelle stoffliche Optimierung vorbereitet (siehe Kapitel 7). Auswertungen von Messdaten im Ablauf und Zulauf der Kläranlage zeigen, dass die KA Homburg-Bröl über ausreichende hydraulische und stoffliche Kapazitäten verfügt. Wie die folgende Tabelle und die Grafiken der Einzelmessungen zeigen, liegen die CSB- und  $\text{NH}_4\text{-N}$ -Ablaufwerte weit unter den genehmigten umweltrechtlichen Grenzwerten von 50 mg/l bei  $\text{CSB}_{\text{nom}}$  und 4 mg/l bei  $\text{NH}_4\text{-N}$  bei  $\geq 6^\circ\text{C}$ .

Tabelle 22: Kläranlage Homburg-Bröl - Ablauf Klärwerk - Einzelmesswerte gemäß SüwV-Kom Berichtsjahre 2007 - 2011

Jahr	Jahresmittelwert CSB Ablauf	Jahresfracht CSB Ablauf	Jahresmittelwert NH4-N Ablauf	Jahresfracht NH4-N Ablauf
2007	18,75 mg/l	80.890 kg/a	0,18 mg/l	2.330 kg/a
2008	19,07 mg/l	55.872 kg/a	0,21 mg/l	1.514 kg/a
2009	17,87 mg/l	62.172 kg/a	0,15 mg/l	1.429 kg/a
2010	16,83 mg/l	54.844 kg/a	0,19 mg/l	1.628 kg/a
2011	17,37 mg/l	49.049 kg/a	0,25 mg/l	1.226 kg/a
Mittelwert	17,98 mg/l	60.565 kg/a	0,20 mg/l	1.625 kg/a

Juni 2008 wird die Stufe 1 der Regelung aktiv geschaltet. Die Messdaten in der Tabelle von 2007 zeigen zu den Werten in den darauffolgenden Jahren mit aktiver Kanalnetzregelung keine signifikante Änderung bzw. höhere Belastung.

Die folgenden Grafiken aus den Jahren 2009 und 2011 geben Einzelmessdaten des CSB und Ammonium-Stickstoffs am Ablauf des Klärwerks Homburg-Bröl wieder. Auch diese Daten zeigen, dass die Konzentration im Ablauf der Kläranlage im Zeitraum der aktiven Kanalnetzregelung weit unter den genehmigten Grenzwerten gelegen hat.

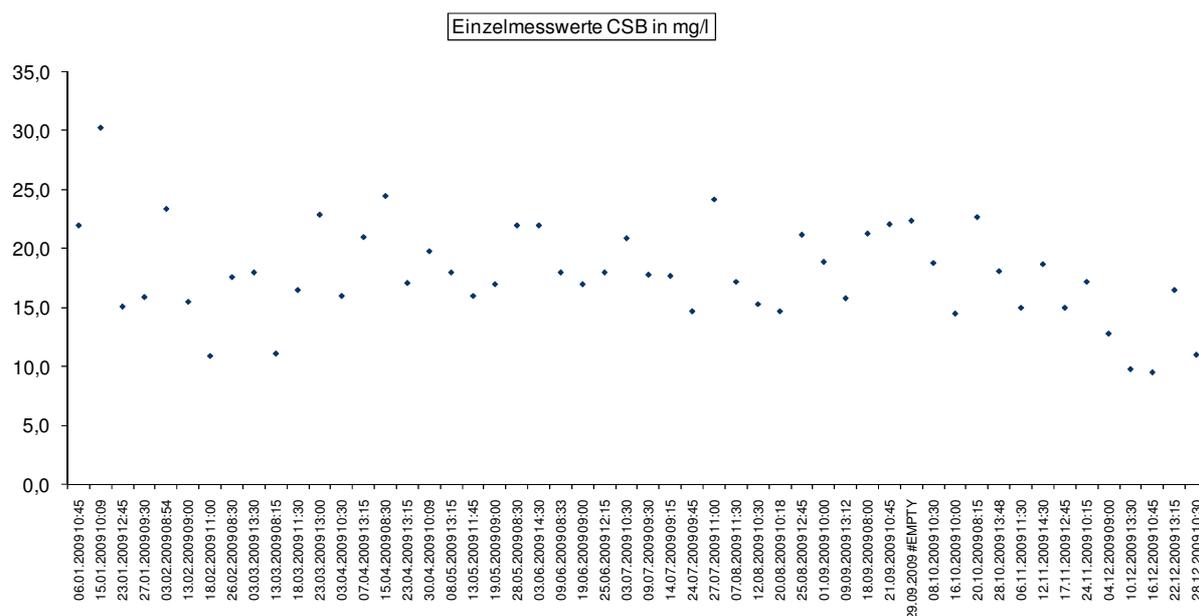


Abbildung 213: Kläranlage Homburg-Bröl - Ablauf Klärwerk - Einzelmesswerte CSB Berichtsjahr 2009

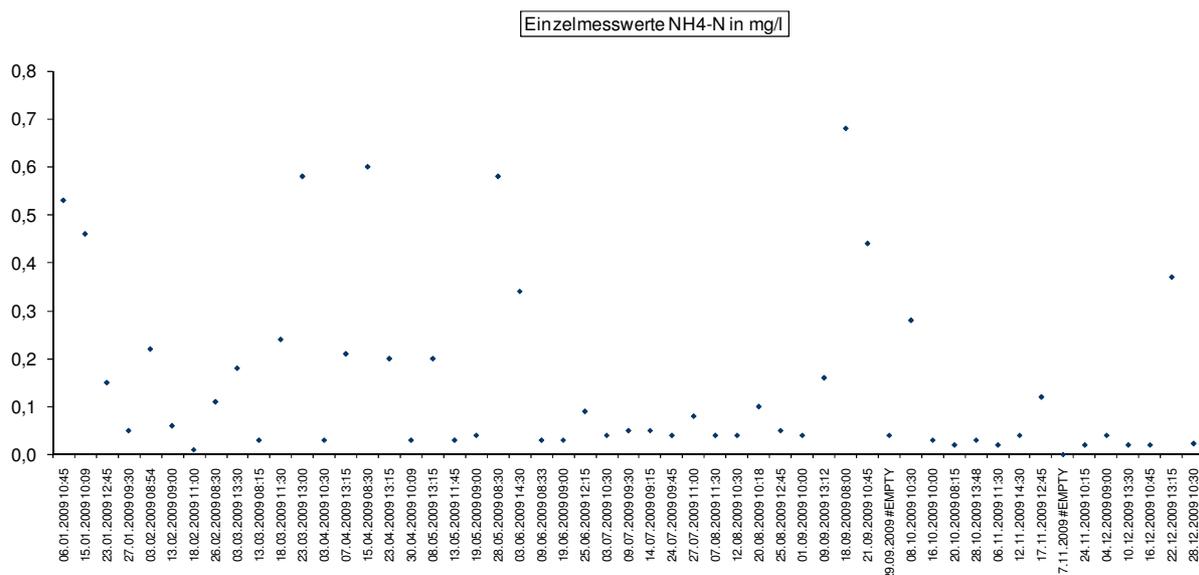


Abbildung 214: Kläranlage Homburg-Bröl - Ablauf Klärwerk - Einzelmesswerte NH4-N Berichtsjahr 2009

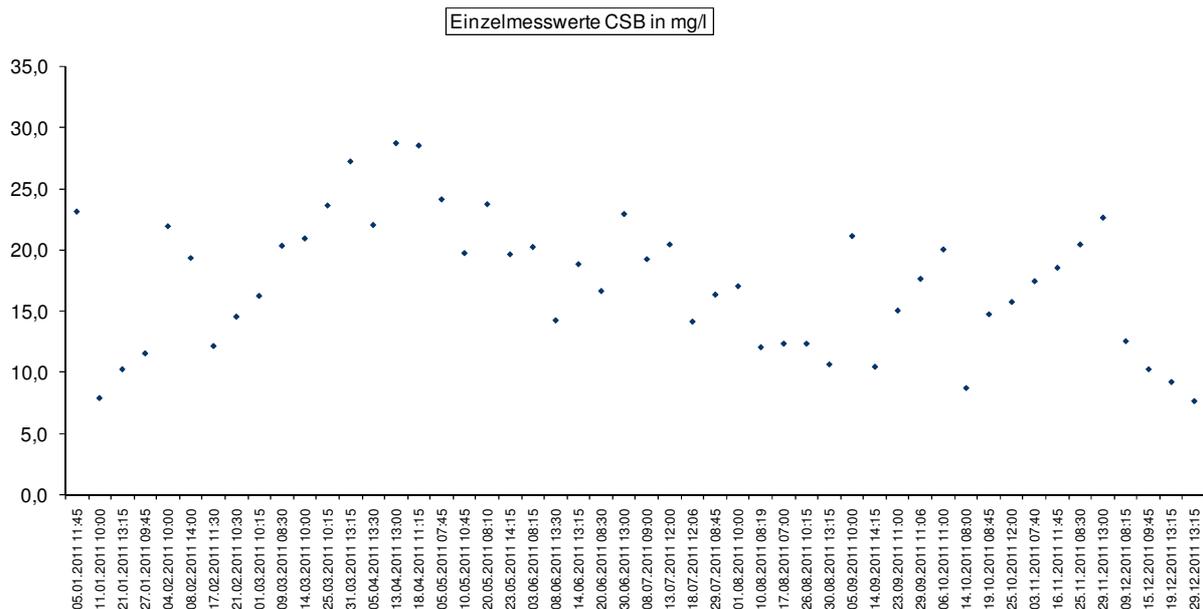


Abbildung 215: Kläranlage Homburg-Bröl - Ablauf Klärwerk - Einzelmesswerte CSB Berichtsjahr 2011

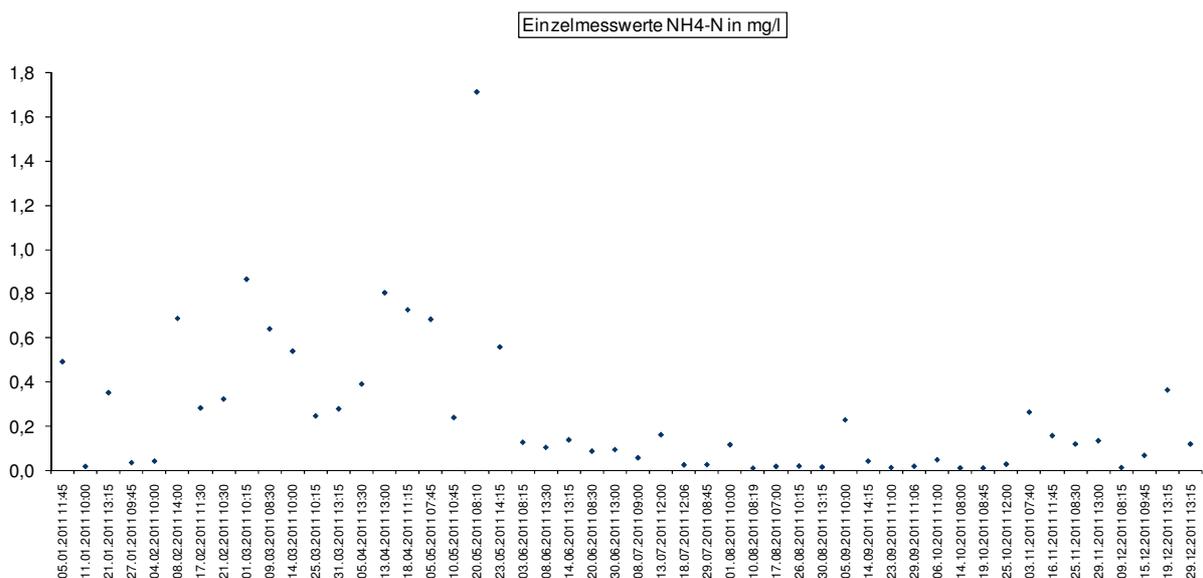


Abbildung 216: Kläranlage Homburg-Bröl - Ablauf Klärwerk - Einzelmesswerte NH4-N Berichtsjahr 2011

Für eine Verbundsteuerung werden außer den Parametern CSB und Ammonium-Stickstoff noch weiter Parameter für eine Optimierung untersucht, wie z.B. die Phosphat-Konzentration.

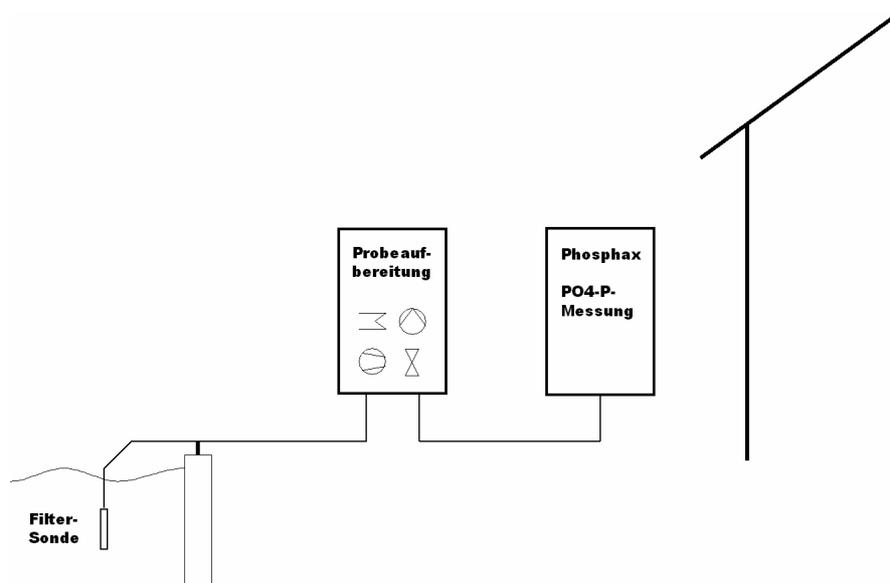
### 17.5.4 Phosphat-Regelung – KA Homburg Bröl

Bestandteil der integrierten Steuer- und Regelungsstrategie des KANNST-Projektes ist die Umsetzung einer Regelung zur Fällmitteldosierung. Fällmittel wird zur Elimination von Phosphat - im Wesentlichen als Orthophosphat (PO<sub>4</sub>-P) vorliegend - in den Zulauf zur Kläranlagenbiologie gegeben. Gelöste Phosphate können mit Hilfe geeigneter Fällungsmittel in ungelöste Phosphate umgewandelt und als Feststoff aus dem Abwasser entfernt werden.

Ein unregelmäßiges, konstantes Zudosieren bei einer stark schwankenden Phosphatbelastung im Zulauf der Kläranlage führt zeitweise zu einer unwirtschaftlichen Überdosierung, da die zugeführte Fällmittelmenge in diesem Fall für die höchst mögliche zu erwartende Belastung (Frachtspitzen) bemessen wird.

Ziel einer frachtabhängigen vorausschauenden Regelung hingegen ist die Reduzierung der Fällmittelmenge bei gleichzeitiger Einhaltung der behördlich vorgegebenen Grenzwerte. Eine solche Regelung soll auch im Projekt zur Anwendung kommen.

Um Frachten als Eingangsgrößen für die Regelung bestimmen zu können, müssen prinzipiell Wassermengen und Konzentrationen gemessen werden. Im Fall der Kläranlage Homburg-Bröl wird eine dauerhafte Messung der Phosphatkonzentration im Ablauf der Vorklärung benötigt. Gemessen wird mit einem „Phosphax“ (Apparatur von FA Hach Lange zur photometrischen Bestimmung nach Gelbmethode). Dieses Gerät benötigt aufbereitetes, gefiltertes Medium um ordnungsgemäß arbeiten zu können. Die dazu bisher eingesetzte konventionelle Technik erweist sich an diesem problematischen Messort als ungeeignet, weil die verwendeten Filter sich schnell zusetzen. Der Hersteller Hach Lange liefert eine neu entwickelte Probenaufbereitung, die für den Einsatzort geeignet erscheint.



**Abbildung 217: Anordnung der Gerätekomponten**

Die genannte neuartige Probeaufbereitung ist zum Zeitpunkt der Berichtserstellung in Auftrag gegeben und soll nach Auslieferung zügig in Betrieb genommen werden.

## 17.6 Probevorbereitung TMS (Hach Lange GmbH) für PO<sub>4</sub>-P-Messung

Die Probevorbereitung beinhaltet eine TMS-Membransonde (ETL Filtrationstechnologie) und hat als Besonderheit eine automatische Rückspülung mit Druckluft und chemischer Reinigungslösung (Wirkung abgestimmt auf statische Reinigung für größtenteils organische Verunreinigungen). Der Pumpenschrank mit Steuereinheit „Siemens LOGO“ und die Saugleitungen können zum Frostschutz beheizt werden.

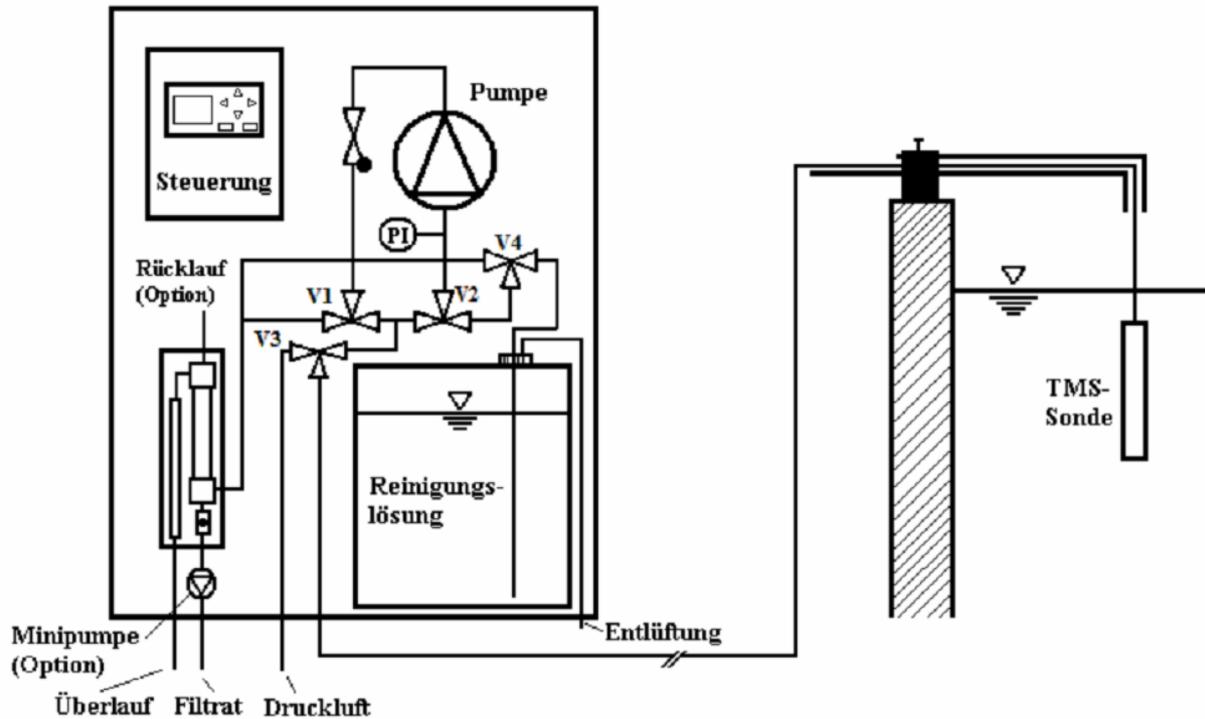


Abbildung 2: Probevorbereitung (Quelle: Bedienungsanleitung „TMS-System mit automatischer Rückspülung“, ETL Verfahrenstechnik GmbH)

## 17.7 Geplante Umsetzung der Regelung

Vorgesehen ist grundsätzlich eine frachtproportionale Fuzzy-Regelung mit der in ähnlich gelagerten Fällen bis zu 50% an eingesetztem Fällmittel eingespart werden. Eingangs-Parameter der Regelung sind der Abwasserzulauf (Volumen), die Konzentration PO<sub>4</sub>-P im Ablauf der Vorklärung und der P-Ablaufwert. Prinzipiell denkbare Orte für die P-Zulaufmessung sind:

- 1.) Ablauf der Vorklärung
- 2.) Zulauf der Kläranlage
- 3.) Zulauf Belebung

Es wird - unter Verwendung der Probevorbereitung - im Ablauf der Vorklärung gemessen, weil an verschiedenen Stellen Prozesswasser zugegeben werden kann, welches im Ablauf der Vorklärung in jeden Fall enthalten ist. Bei einer Messung im Zulauf der Kläranlage hätte man deutlich mehr Probleme mit Grobstoffen. Außerdem würde das Prozesswasser von der Messung unberücksichtigt bleiben. Es wird nicht im Zulauf zu den Belebungsbecken gemessen, weil es zwei parallele Straßen gibt, die unter Umständen unterschiedliche Konzentrationen aufweisen können. Der Aufwand für zwei getrennte Messungen wäre erheblich. Es ist weiterhin ungünstig im Zulauf der Belebung zu messen, weil hier bereits das Fällmittel zugesetzt wird und sofort zu reagieren beginnt. Bei der gewählten vorgelagerten Messung im Ablauf der Vorklärung ist das Messmedium vollständig durchmischt und es verbleibt mehr Reaktionszeit für die Regelung.

Für eine frachtproportionale Regelung wird laufend das Produkt von Wassermenge und Wert der Phosphatmessung (Konzentration) berechnet. Bei einem Ausfall von beteiligten Messungen oder der kompletten Regelung wird auf eine konstante Dosierung des Fällmittels Natriumaluminat NaAl(OH)<sub>4</sub>

umgeschaltet. Zudosiert wird im Zulauf zur Biologie, es gibt 2 FU-geregelte Dosierpumpen (eine je Straße). Fällt die Regelung aus, so wird Fällmittel in einem Bereich von 80-200 l/d - manuell eingestellt - im Dauerlauf zudosiert.

Aufgrund der neuen Probevorbereitung soll die automatische Fällmitteldosierung weniger störungsanfällig sein. Der Personalaufwand wird voraussichtlich deutlich verringert, weil die Messung nicht mehr andauernd manuell von Fettverschmutzungen gereinigt werden muss.

## **18 Auswertung der Steuerstrategie und Nachweis der Einhaltung der wasserrechtlichen Vorgaben**

In diesem Kapitel werden Ergebnisse der Steuerstrategie und Nachweise der Einhaltung der wasserrechtlichen Vorgaben unter Einsatz der drei Regelungsstufen aufgezeigt. Für jede der drei Stufen steht jeweils ein Zeitraum von ca. einem Jahr zur Auswertung zur Verfügung. Das Verhalten der Regelung, Stellwerte und die Drosselmengen, die die Regler für die einzelnen RÜB vorgeben, werden mit Hilfe eines zentralen Rechners dokumentiert. Anhand dieser Aufzeichnungen lässt sich die Funktionsweise des Regelungskonzepts nachvollziehen.

### **18.1 Verhalten des Reglers im Kanalnetz**

Für die Dokumentation der Steuerstrategie wird am Beispiel für das RÜB Hast das Verhalten in Stufe 1 erläutert (hydraulische Vergleichmäßigung).

In Abbildung 218 werden die vorgegebenen Stellwerte (blau) für die Drossel am RÜB Hast gezeigt. Zu Beginn (Grundzustand = Drosseln komplett geöffnet) und zu Ende des Ereignisses liegen die vorgegebenen Drosselwassermengen deutlich über den Werten des tatsächlichen Ablaufs (orange), da die Wassermengen im Kanalnetz zu diesem Zeitpunkt niedriger sind.

Am Ende des Zeitraums sind die Wechsel zwischen der festen „hohen“ und „niedrigen“ Drosselmengen zu erkennen. Diese ergeben sich aus den Vorgaben eines belasteten und unbelasteten Kanalnetzes. Das sind für RÜB Hast 40 und 66 l/s.

Am 30.09.08 gegen 12:00 Uhr beginnt der Füllstand im Becken (grün) zu steigen. Der Schieber der Drossel verlässt die Grundstellung. Der Zustandsgenerator befindet sich jetzt im Zustand 4 und die Fuzzy-Regelung für diesen Zustand gibt die Stellwerte vor. Dadurch nimmt der Schieber angepasste Stellungen - nach Vorgaben der Fuzzy-Regelung - ein und die Ablaufmenge wird nun von der Drosselwassermenge bestimmt; die Kurven des Ablaufs und des Stellwertes verlaufen nahezu identisch.

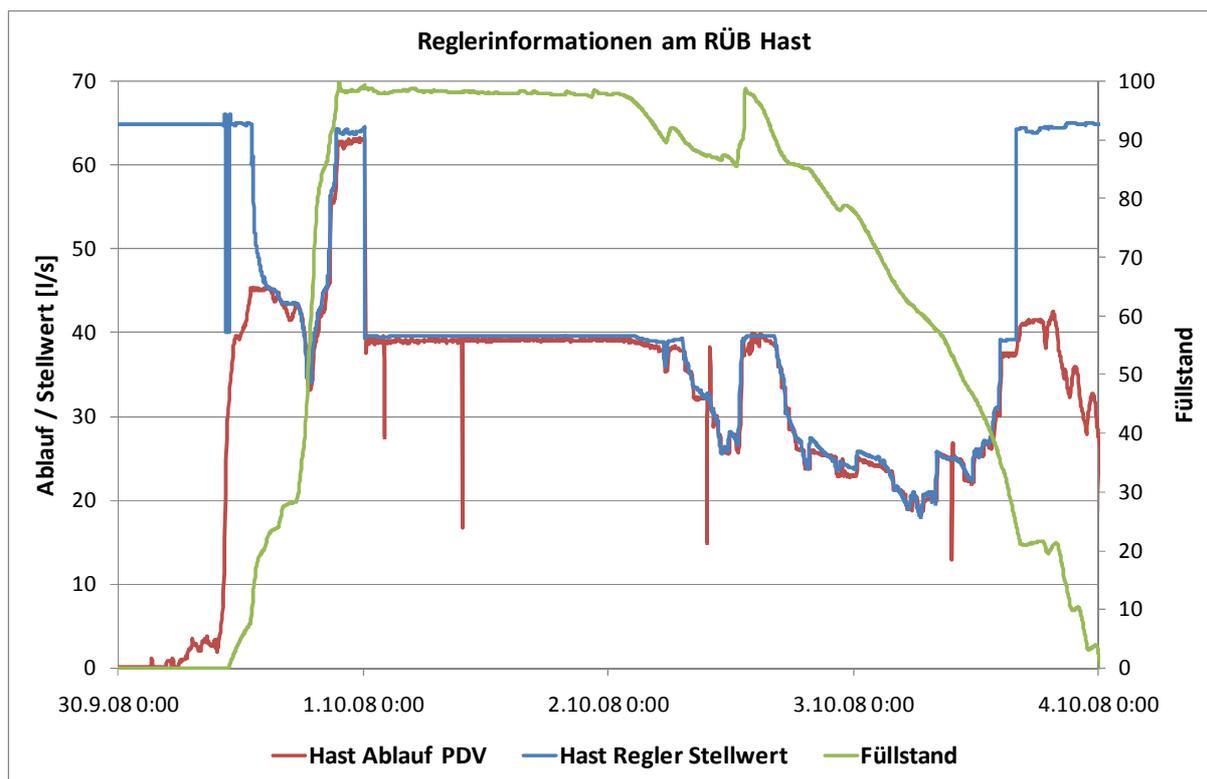


Abbildung 218: Vergleich Ablauf – Stellwert – Füllstand am Beispiel RÜB Hast

Nachdem die Niederschlagsmessung ein Ende des Regenereignisses gemeldet hat und der Beckenfüllstand wieder sinkt (nach 3.10.08 12:00 Uhr), stellt sich Zustand 1 ein und der Drosselschieber öffnet sich maximal auf die Drosselwassermenge für ein unbelastetes Kanalnetz. Außerdem ist zu erkennen, dass am 4.10.08 der Regler aus dem Zustand für ein „belastetes“ in ein „unbelastetes“ Kanalnetz wechselt.

Durch die Grafik aus Abbildung 218 ist sehr gut erkennbar, dass der Regler vorausschauend arbeitet. Ermöglicht wird dies dadurch, dass nicht nur auf aktuelle Füllstände in den Becken reagiert wird, sondern auch die Auswertungen der Niederschlagsmessungen zur Reglereinstellung in die Berechnungen einfließen (siehe Kapitel 5.4). Je früher die Drosselwassermenge dem kommenden Ereignis angepasst wird, desto effektiver kann der Regler arbeiten.

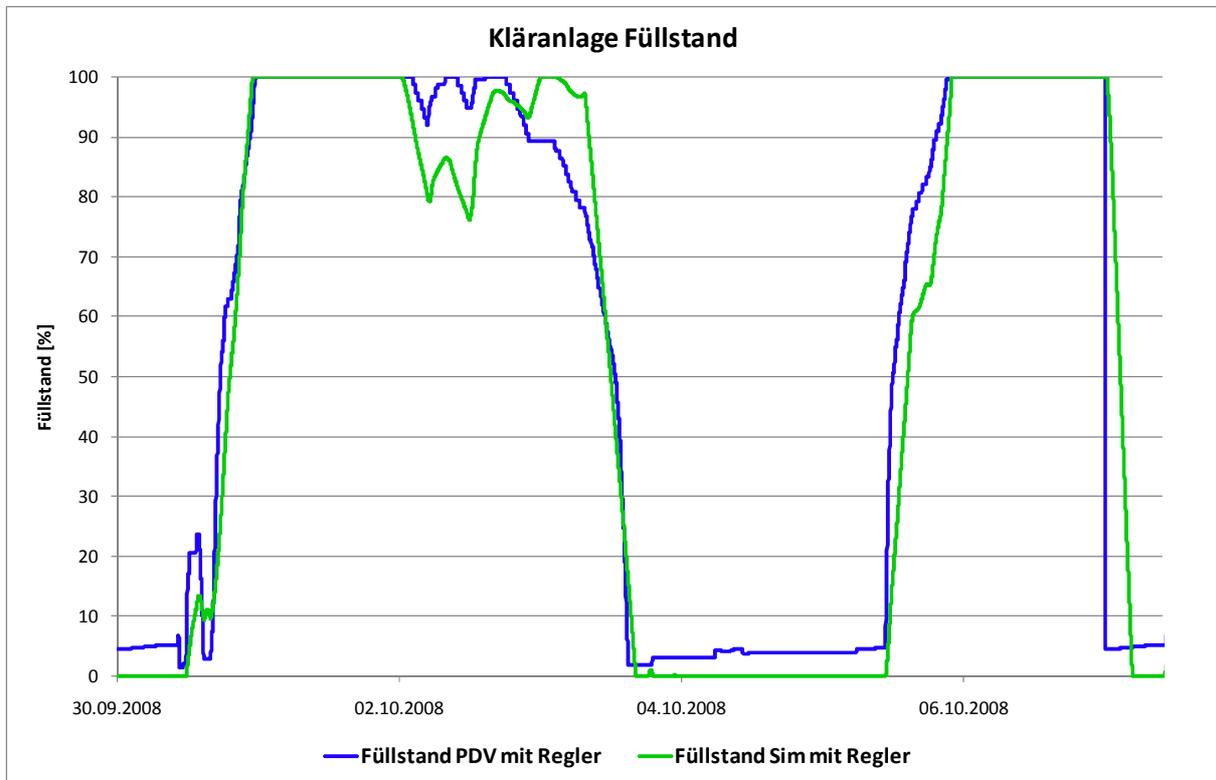
### 18.1.1 Vorgehensweise für die Auswertung der Steuerstrategie

Für die Auswertungen, bezogen auf die Effektivität der Regelung, wird ein Szenario im Zeitraum zwischen dem 30.09. und dem 07.10.08 ausgewählt. Dieses entspricht einem unter 2-jährlichen Niederschlagsereignis.

Zum Vergleich werden Messdaten aus der PDV aus dem Kanalnetz Homburg-Bröl den Daten aus der Simulation gegenübergestellt. In einem ersten Schritt werden Parameter in einer Simulation mit Regler angepasst und die Ergebnisse mit den Messdaten aus dem geregelten Kanalnetz validiert. Diese optimierte Simulation ist die Grundlage für einen Nachweis des Einsparpotenzials, bezogen auf ein geregeltes und ungeregeltes Kanalnetz.

Dabei ist es sehr wichtig, den Füllstand (wie in Abbildung 221) möglichst realitätsgetreu zu simulieren, da dieser für die Regelung eine entscheidende Größe darstellt.

Der Füllstand für das Becken fällt in den PDV-Daten aus technischen Gründen nicht unter 2-3%, da die Messung sich an einem Punkt im Becken befindet, an dem das Wasser nicht ganz zurück geht, wenn das Becken leer gepumpt wird (Pumpensumpf).



**Abbildung 219: Verlauf des Füllstandes im Becken KA**

Durch einen direkten Datenvergleich von aufgezeichneten Messdaten aus der PDV und den Daten aus der Simulation kann eine realitätsnahe Modellierung nachgewiesen werden, in der die tatsächlich entlasteten Wassermengen im Modell mit den gemessenen nahezu übereinstimmen. Diese hohe Qualität der Simulation kann aus den folgenden beiden Grafiken entnommen werden. Die gemessenen und simulierten Entlastungsmengen an den einzelnen RÜB zeigen keine relevanten Abweichungen.

Die Auswertung in Abbildung 219 zeigt einen Kurvenverlauf der Entlastung beim Niederschlagsereignis von Anfang Oktober 2008 am Becken Kläranlage. Diese lässt erkennen, dass die Simulation auch die Dynamik und nicht nur die Entlastungsmengen realistisch abbilden kann. Die gute Abbildung des Niederschlagsabflussverhaltens im Modell ist die Voraussetzung für eine wissenschaftlich korrekte Auswertung der Reglerstufen in der Simulation.

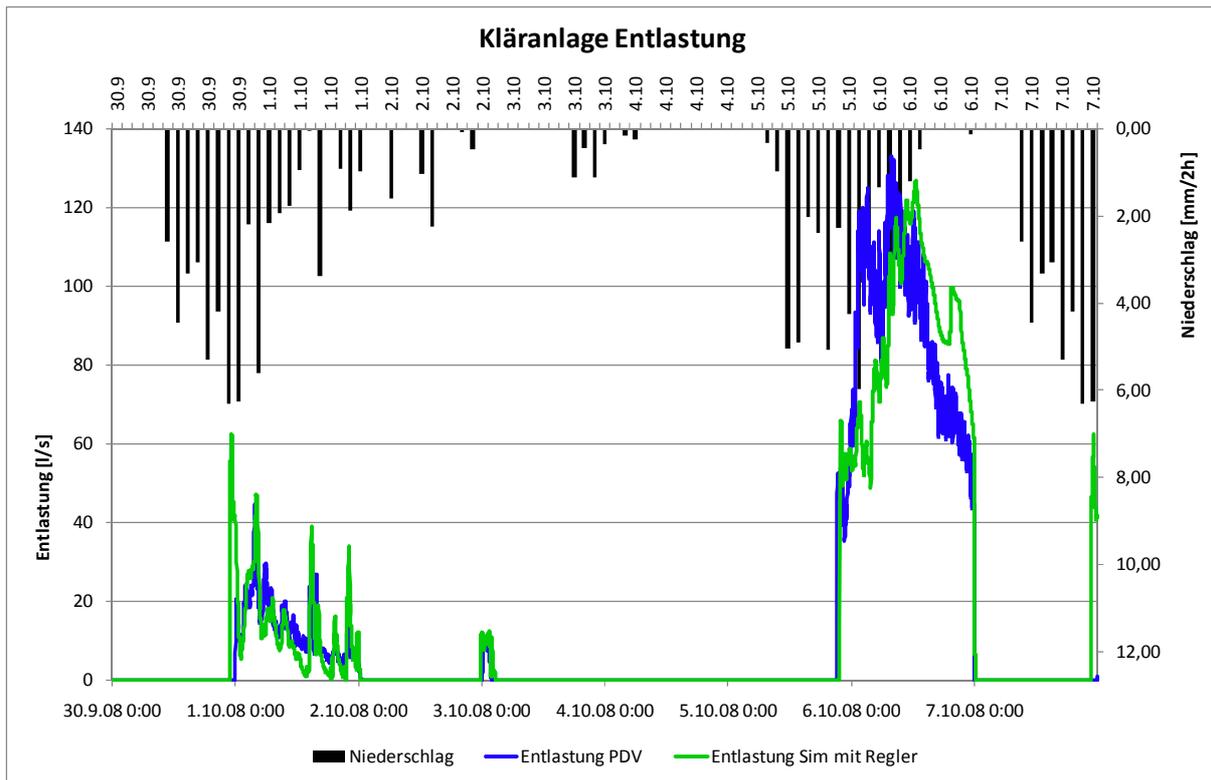


Abbildung 220: Verlauf der Entlastung am Becken KA

In einem nächsten Schritt wird die Simulation des gleichen Regenereignisses im genannten Zeitraum, ohne Einsatz des Fuzzy-Reglers, mit den fest eingestellten Drosselwassermengen durchgeführt. Ziel ist es, das Verhalten mit und ohne Einsatz des Reglers zu vergleichen.

Die Entlastungsmengen ohne Einsatz des Reglers sind zum großen Teil deutlich höher als die wirklich gemessenen Entlastungen (PDV) unter Einsatz des Reglers in Stufe 1. Im direkten Vergleich ist zu erkennen, dass der Regler zu einer deutlichen Reduzierung der Entlastungsmengen führt (Abbildung 221 und Abbildung 222).

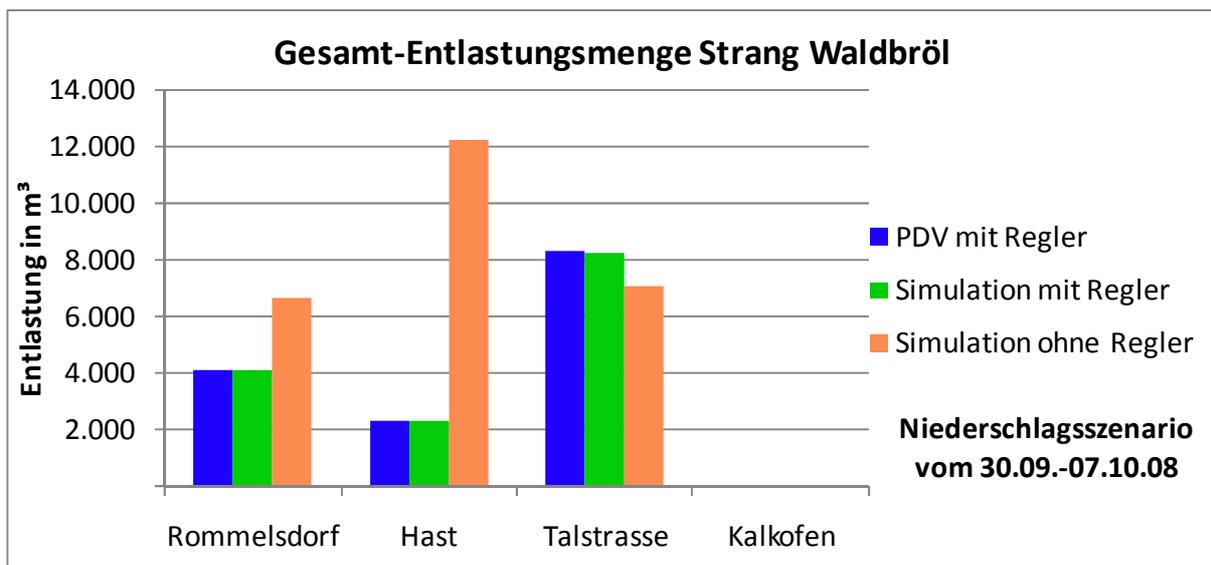


Abbildung 221: Summe der Entlastungsmengen im Vergleich; Strang Waldbröl

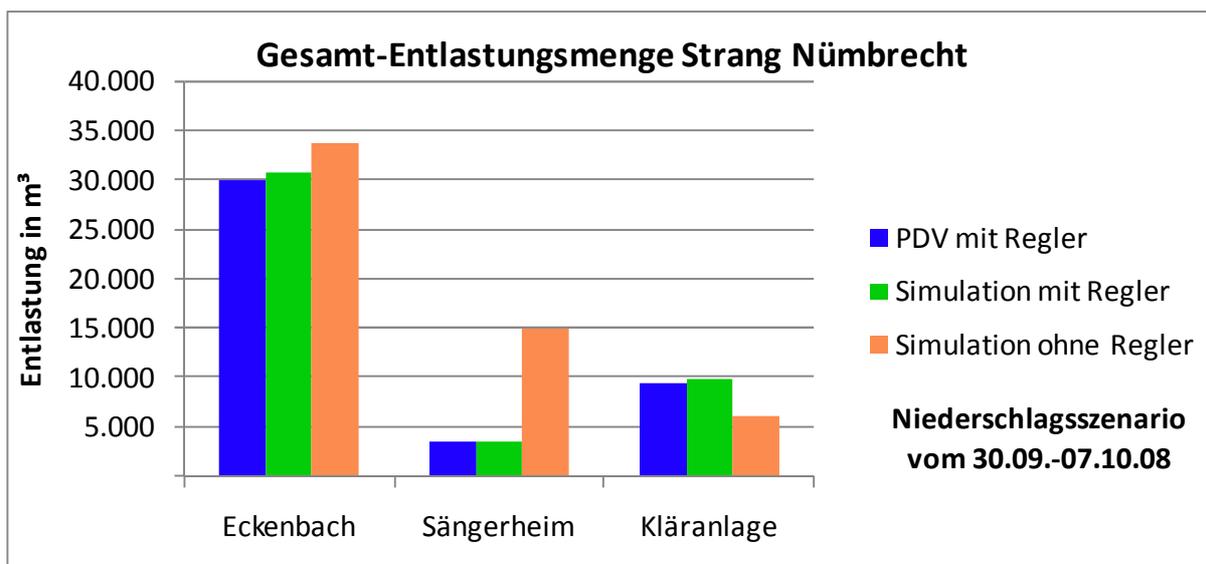


Abbildung 222: Summe der Entlastungsmenge im Vergleich; Strang Nümbrecht

Dies kann beispielsweise dadurch erreicht werden, dass lange Nachläufe vermieden bzw. deutlich verkürzt werden (Abbildung 223), indem die Wassermengen innerhalb des Kanalnetzes gleichmäßiger verteilt werden.

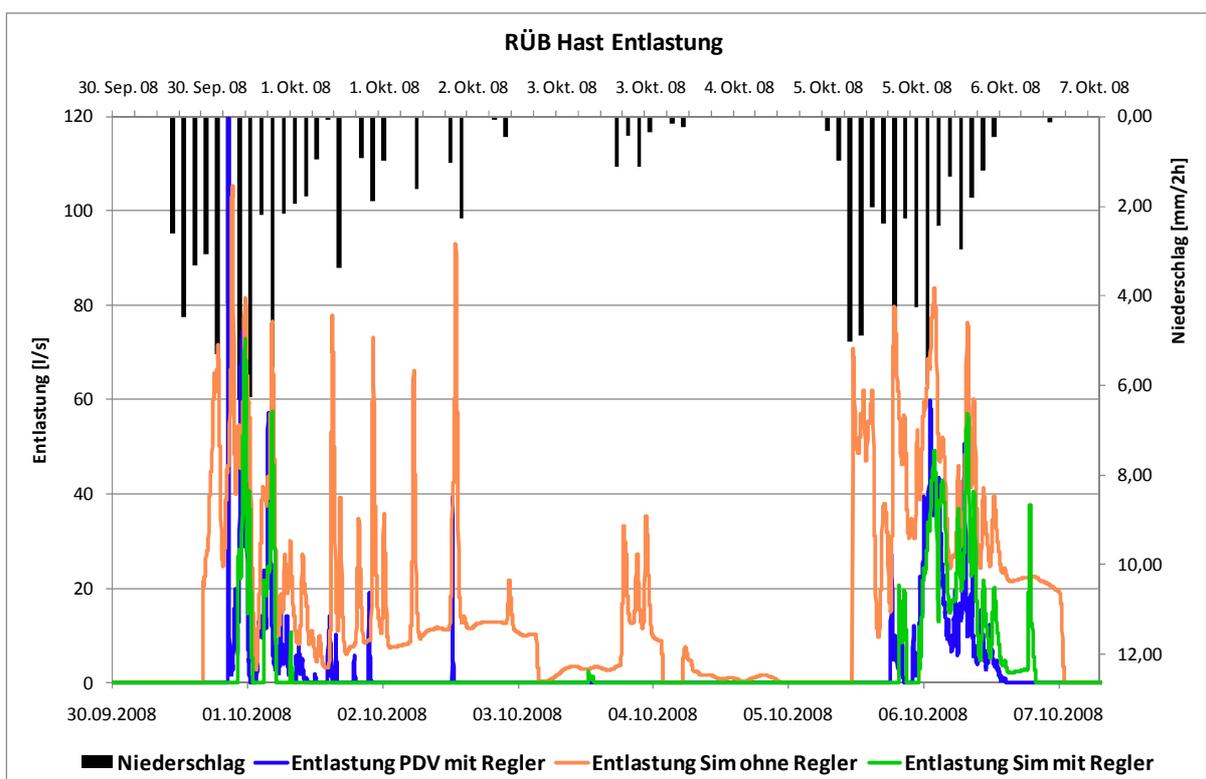


Abbildung 223: Verlauf Entlastung RÜB Hast

Die grüne Kurve stellt den Entlastungsverlauf des RÜB Hast mit Fuzzy-Regelung dar; die orange-farbige Kurve bildet den Verlauf mit festen Drosselwassermengen (ohne Regelung) ab. Der lange

Nachlauf vom 02.10. bis zum 4.10.08 kann durch den Regler ganz verhindert werden und auch die Entlastungsspitzen, wie sie beispielsweise am 6.10.08 auftreten, fallen deutlich geringer aus.

Die folgenden beiden Grafiken zeigen ebenfalls die Effektivität der Regelung (Entlastung simuliert und PDV) in einem Vergleich zum unregulierten Netz (Entlastung Sim ohne Regler) am Becken Eckenbach und Sängersheim.

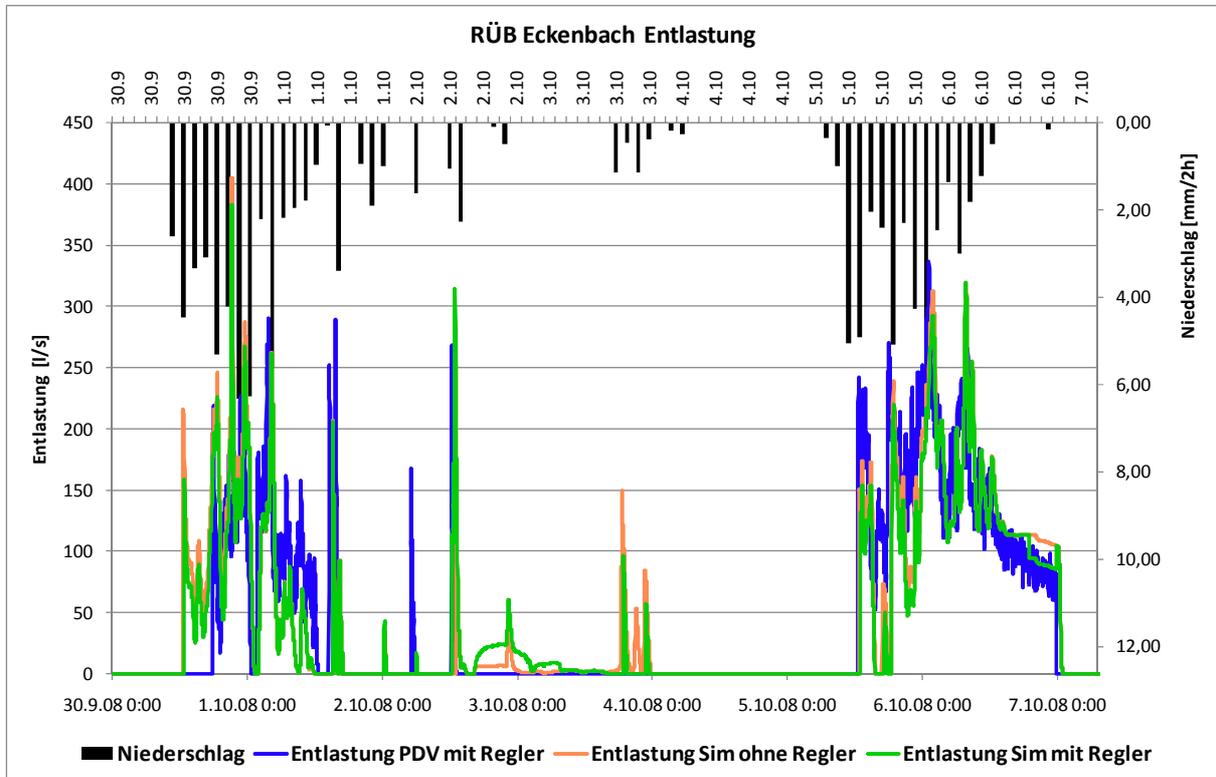


Abbildung 224: Entlastung am RÜB Eckenbach (mit / ohne Regelung)

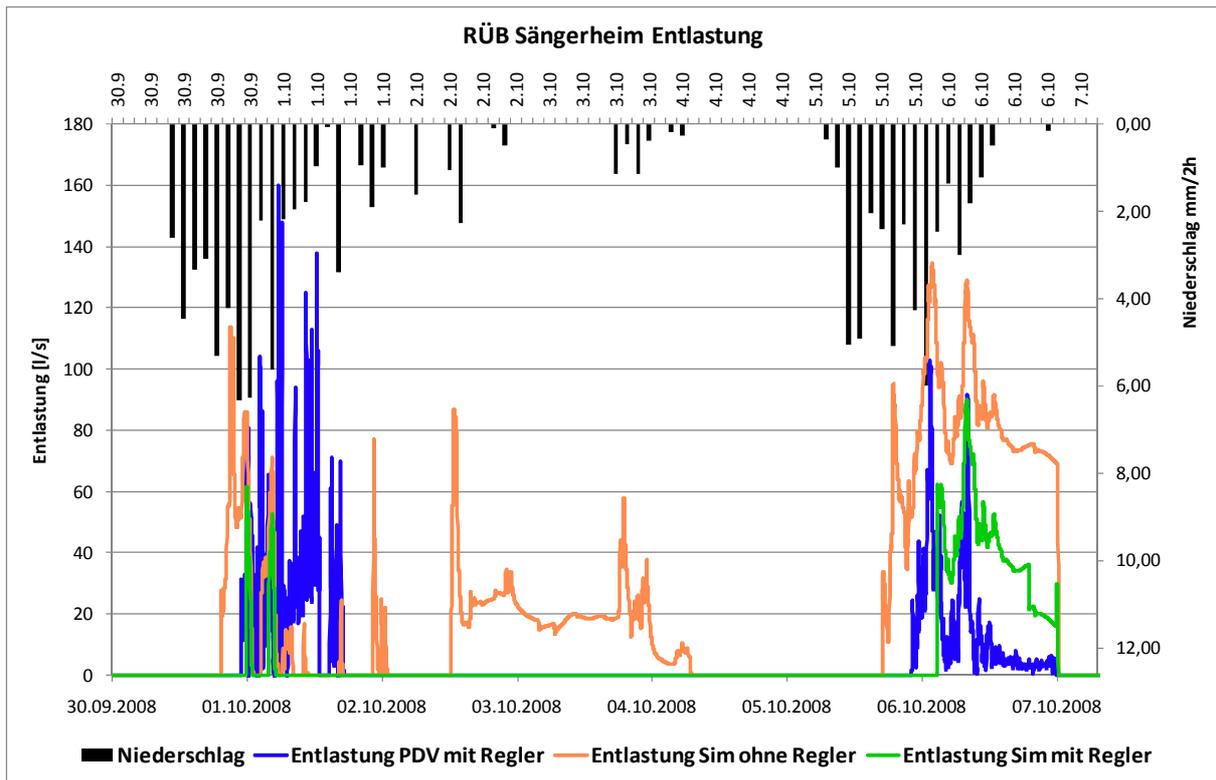


Abbildung 225: Entlastung am RÜB Sängenheim (mit / ohne Regelung)

Eine Verbesserung wird erzielt, indem bislang nicht genutzte Becken-Kapazitäten mit einbezogen werden. Die Abbildung 226 zeigt einen Vergleich zwischen dem Füllstand im Becken mit (grün) und ohne (orange) Regler.

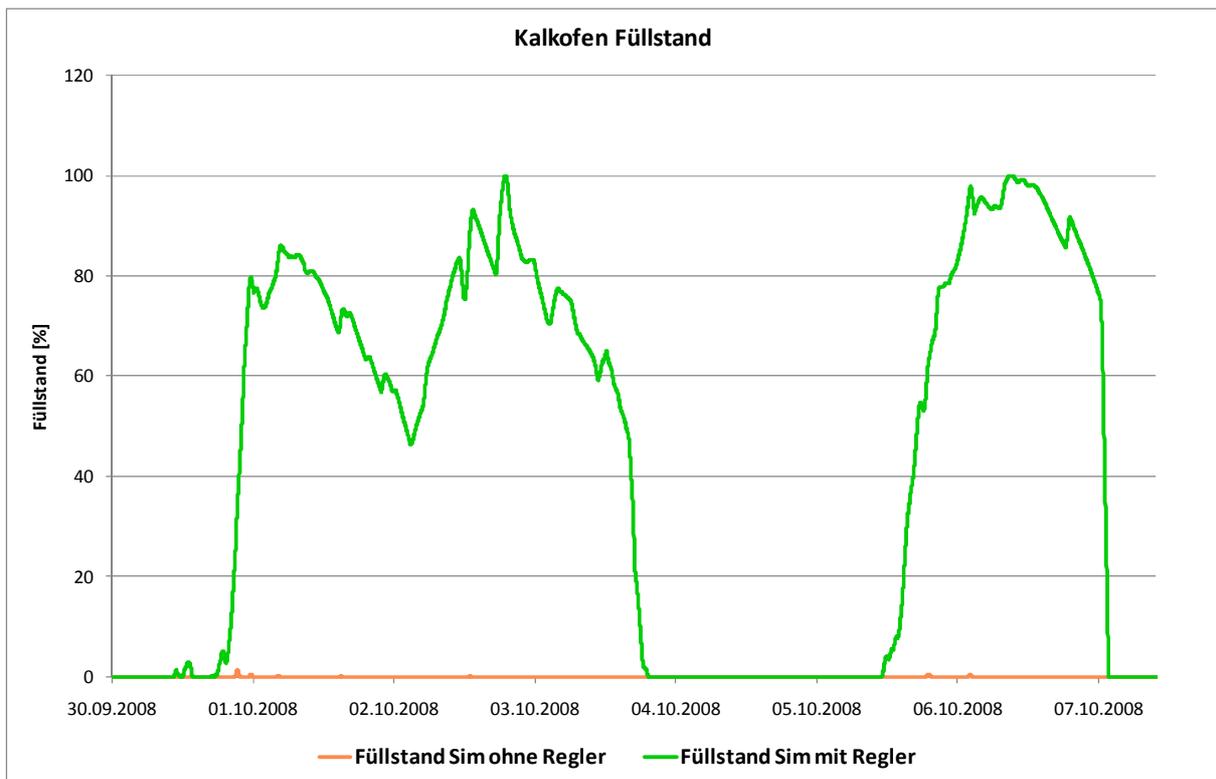


Abbildung 226: Verlauf Füllstand RÜB Kalkofen (mit / ohne Regelung)

Hier ist deutlich zu erkennen, dass ohne Einsatz des Reglers das Becken vollständig leer bleibt. Durch die Regelung der Drosselschieber an den RÜB kann das RÜB Kalkofen Wasser aufnehmen, das ansonsten an den vorhergelegenen Becken zu Entlastungen geführt hätte. An diesem Becken werden der Effekt der Regelung und das freie Potenzial besonders deutlich, wobei vorher ungenutztes Volumen zur Vergleichmäßigung herangezogen wird.

Durch die wesentlich bessere und gleichmäßigere Verteilung in den Becken des gesamten Strangs können erhebliche Reduzierungen der Entlastungswassermengen erzielt werden. Dieses Potenzial ist in Abbildung 227 in einer Gesamtübersicht dargestellt.

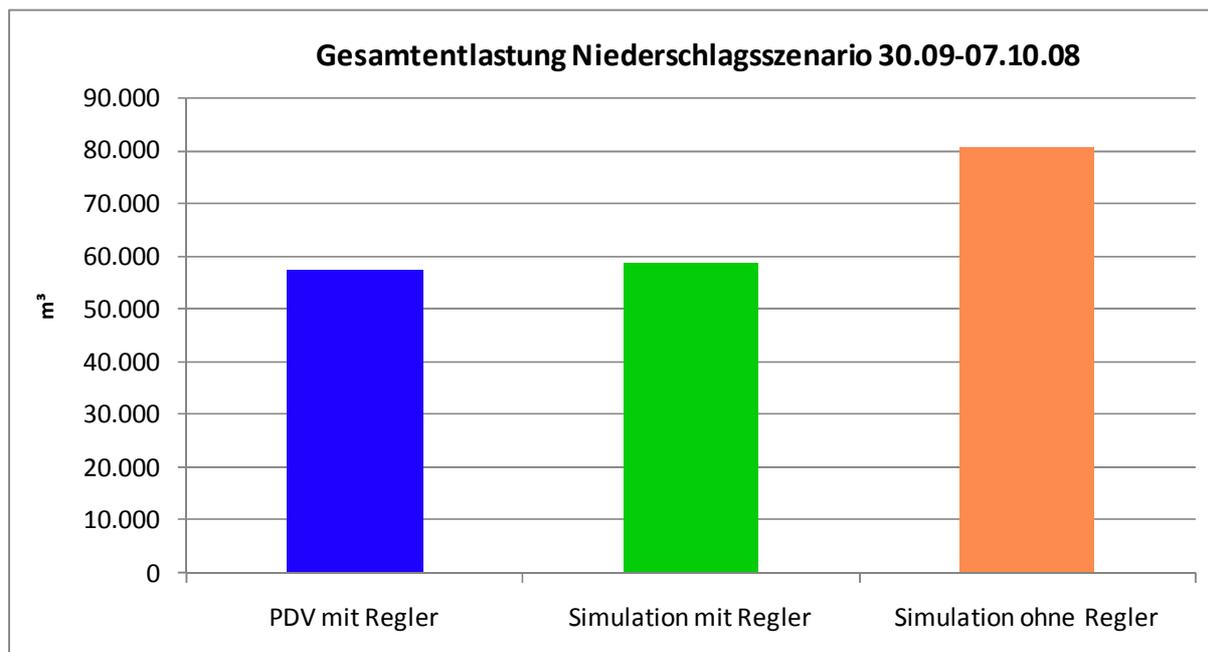


Abbildung 227: Gesamtübersicht Einsparungen Entlastungen

Insgesamt werden bei diesem Regenereignis 29 % der gesamten Entlastungsmenge im Kanalnetz Homburg-Bröl reduziert. Diese Wassermengen können zusätzlich über die Kläranlage gereinigt dem Bachlauf wieder zugeführt werden.

Tabelle 23: Reduzierungen und Entlastungen für das Szenario vom 30.09.-07.10.08

	PDV mit Regler	Simulation mit Regler	Simulation ohne Regler
<b>Gesamtentlastung</b>	57.583 m <sup>3</sup>	58.669 m <sup>3</sup>	80.718 m <sup>3</sup>
<b>Reduzierung</b>	29%	27%	

## 18.2 Regelungspotenzial und Auswertung der Messwerte in Stufe 1

Nicht bei jedem Regenereignis kommen die positiven Effekte einer hydraulischen Regelung in gleichem Umfang zur Geltung. Darum wird in diesem Abschnitt dargestellt, bei welchen Arten von Ereignissen außergewöhnliches Regelungspotenzial besteht und unter welchen Umständen geringere Reduzierungen des Entlastungsvolumens zu erwarten sind.

Um Stärken und Schwächen der verwendeten hydraulischen Kanalnetzregelung aufzuzeigen, werden exemplarisch ein Ereignis mit großer Wirksamkeit der Regelung und ein zweites Geschehen mit relativ geringer Einflussnahmemöglichkeit ausgewertet. Das folgende Balkendiagramm verdeutlicht wie effizient die hydraulische Kanalnetzsteuerung bei bestimmten Einzelereignissen arbeiten kann.

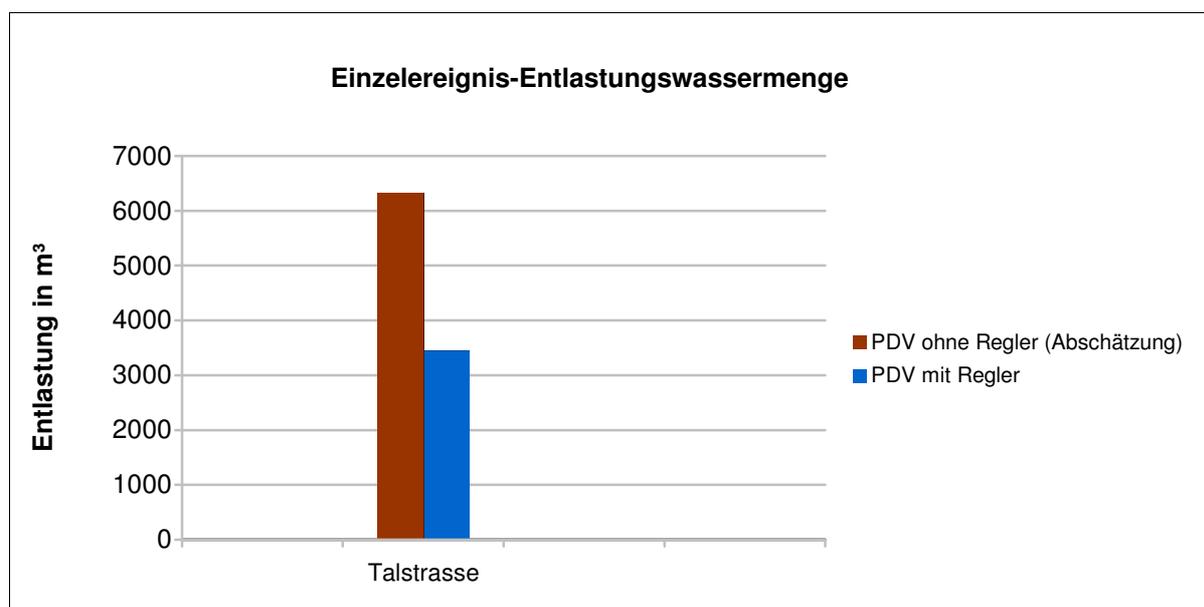


Abbildung 228: Talstraße, großes Regelungspotenzial, Ereignis vom 10.03.2009

Bei diesem Beispiel kann die Entlastungswassermenge um etwa 45 % reduziert werden. Die besonderen Umstände, die zu einer solchen Reduzierung führen, werden anhand der Darstellung mit aufgezeichneten RÜB-Messwerten (s. Abb. 233) beschrieben. Die rote Kurve gibt den Verlauf der Drosselwassermenge wieder. Während eines Niederschlagsereignisses mit ausreichend Wasser im Kanal sollte die Drosselwassermenge mit den Vorgaben des Kanalnetzreglers übereinstimmen. Es ist zu erkennen, dass nach einsetzendem Niederschlag (graue vertikale Linien) sich das Becken füllt (grüne Kurve). Bei dem Niederschlagsereignis handelt es sich laut KOSTRA-Tabelle um ein unter 0,5 jährliches Ereignis. Niederschläge mit vergleichbaren Intensitäten treten jährlich im Durchschnitt etwa zweimal auf.

Der Regler gibt eine Drosselwassermenge von knapp 70 l/s vor. Obwohl es zu einer Entlastung (blau) kommt, ist diese deutlich vermindert. Ohne Regelung würden konstant nur 55 l/s zur Kläranlage abgeleitet, in diesem Fall würden also 15 l/s zusätzlich entlastet.

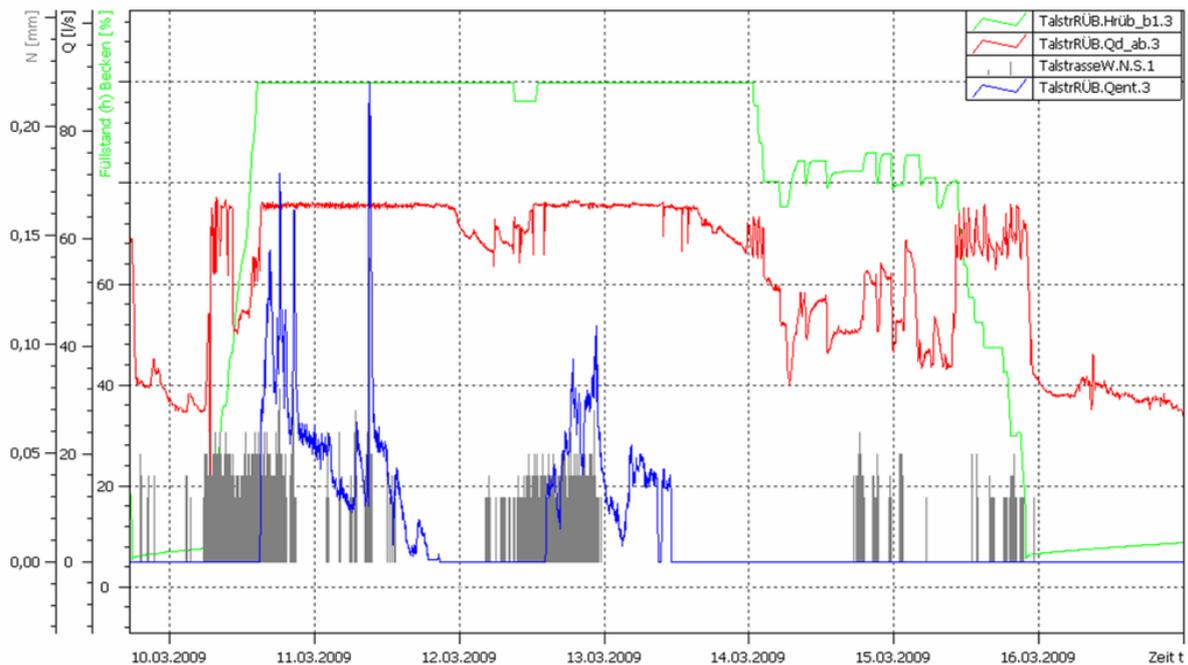


Abbildung 229: Messwerte RÜB Talstrasse, Ereignis vom 10.03.09

Im Gegensatz dazu gehört das zweite Balkendiagramm zu einem Ereignis mit wenig Regelungspotential. Es treten über mehrere Stunden hinweg verhältnismäßig große Niederschlagshöhen und enorme Wassermengen im Kanal auf (2-jährliches Ereignis laut KOSTRA-Tabelle). Man erkennt dies an Entlastungsvolumenströmen von über 600 l/s in der Spitze.

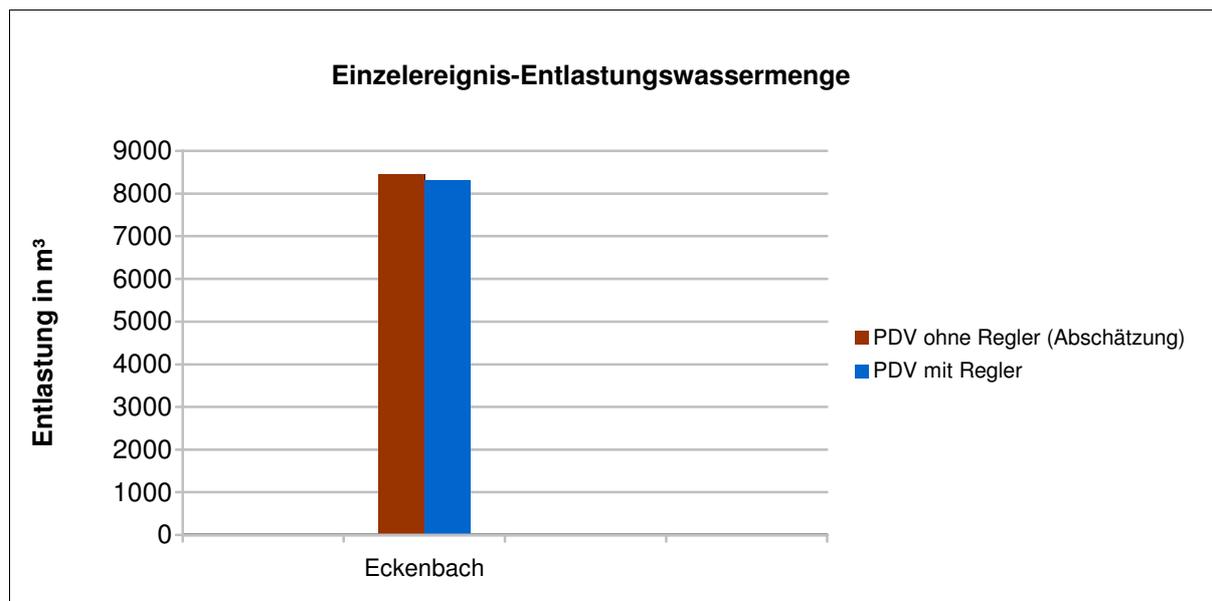
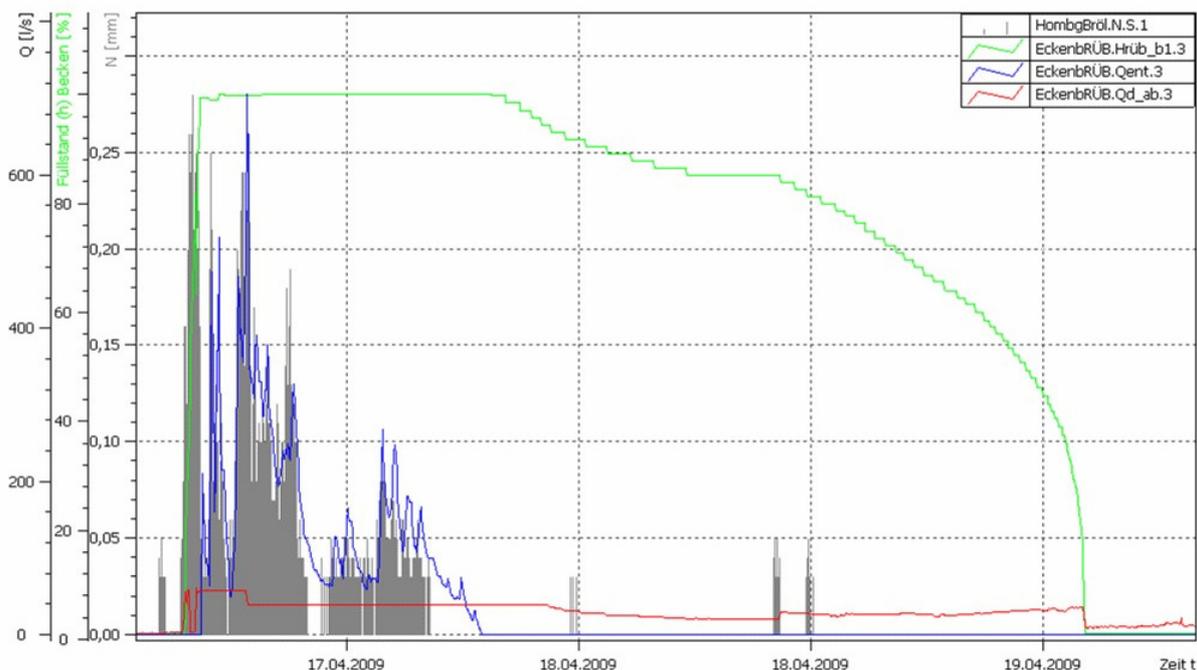


Abbildung 230: Eckenbach, Geringes Regelungspotential, Ereignis vom 17.04.2009

Angesichts solcher Wassermengen fallen 19 l/s Ersparnis (Differenz mit und ohne Regelung) weniger ins Gewicht. Bei diesem Ereignis kann die Entlastungswassermenge durch die Regelung lediglich um

ca. 2 Prozent reduziert werden. Die Grafik zeigt auch, dass der Regler nach einiger Zeit kleinere Sollwerte vorgibt (41 l/s anstelle von zuvor 60 l/s, man erkennt eine „Stufe“ in der roten Kurve). Dieser Verlauf lässt sich wie folgt erklären: Vom genannten Zeitpunkt an entlasten sämtliche Becken, es gibt kein freies Volumen und daher auch kein Regelungspotential. Der Regler gibt in derartigen Fällen eine reduzierte, feste Drosselwassermenge vor.



**Abbildung 231: Messwerte RÜB Eckenbach, Ereignis vom 17.04.09**

Abschließend bleibt festzuhalten, dass die hydraulische Regelung bei vergleichsweise schwächeren oder kurzen Regenfällen (wie im ersten dargestellten Beispiel „RÜB Talstraße“) tendenziell bessere Resultate erzielt. Eine signifikante Reduzierung, bezogen auf das gesamte Entlastungsvolumen, sowie eine beträchtlich verringerte Menge (absolut gesehen) ist an derartige Ereignisse gebunden.

### 18.2.1 Langzeitauswertung der Messdaten und Nachweis der Einhaltung der wasserrechtlichen Vorgaben

Die folgenden Tabellen zeigen eine Auswertung der Kanalnetzregelung im Kanalnetz Homburg-Bröl für die beiden Hauptkanalnetzstränge Waldbröl und Nümbrecht. Aufgeführt werden die durch den Einsatz der Regelung verhinderten Entlastungen, hydraulischen Entlastungsmengen, NH<sub>4</sub>-N Frachten sowie die Entlastungsraten. Dabei sind die erzielten Reduzierungen der Entlastungswassermengen unter Einsatz der Regelung deutlich erkennbar.

**Tabelle 24: Auswertung vom Hauptstrang Waldbröl im Kanalnetz Homburg-Bröl unter Einsatz der Kanalnetzregelung in Stufe 1**

	RÜB Kalkofen		RÜB Talstraße		RÜB Hast		RÜB Rommelsdorf	
Verhinderte Entlastungen	4		4		5		1	
Reduzierte Entlastungswassermenge Juni 08 - März 10	19.800 m <sup>3</sup>	43 %	27.008 m <sup>3</sup>	25 %	25.095 m <sup>3</sup>	67 %	7.594 m <sup>3</sup>	51 %
Frachtreduzierung NH <sub>4</sub> -N	44 kg		61 kg		90 kg		8 kg	
Entlastungsrate Juni 08 - März 10	erlaubt Netzplan	mit Regelung	erlaubt Netzplan	mit Regelung	erlaubt Netzplan	mit Regelung	Erlaubt Netzplan	mit Regelung
	25 %	2 %	23 %	7 %	23 %	2 %	24 %	2,85 %

**Tabelle 25: Auswertung vom Hauptstrang Nümbrecht im Kanalnetz Homburg-Bröl unter Einsatz der Kanalnetzregelung in Stufe 1**

	RÜB Kläranlage		RÜB Sängenheim		RÜB Eckenbach	
Verhinderte Entlastungen	-		2		2	
Reduzierte Entlastungswassermenge Juni 08 - März 10	- 29.000 m <sup>3</sup>	- 38 %	15.435 m <sup>3</sup>	48 %	2.900 m <sup>3</sup>	3 %
Frachtreduzierung NH <sub>4</sub> -N	- 58 kg		37 kg		6 kg	
Entlastungsrate Juni 08 - März 10	erlaubt Netzplan	mit Regelung	erlaubt Netzplan	mit Regelung	erlaubt Netzplan	mit Regelung
	26 %	4,6 %	34 %	1 %	24 %	15 %

Diese Ergebnisse basieren auf Auswertungen der Messdaten aus dem mehrjährigen Betrieb der Regelung in Stufe 1. Die Frachtmengen werden berechnet auf Grundlage von gemessenen Durchschnittstagesgängen.

Unter Einsatz von Stufe 1 kann eine Einsparung der hydraulischen Entlastungsmenge für den Zeitraum von Juni 2008 bis März 2010, für den Strang Waldbröl von durchschnittlich 46 % und für den Strang Nümbrecht von durchschnittlich 4 % nachgewiesen werden. Das bedeutet für das gesamte Kanalnetz eine Einsparung von 28 % durch Einsatz dieses Reglers.

Auffällig ist die erhöhte Entlastungswassermenge am RÜB KA. Das hat folgende Ursache: Die Steuerung in Stufe 1 sieht eine hydraulische Vergleichmäßigung aber auch den priorisierten Transport der Wassermengen zur Kläranlage vor. So soll erreicht werden, dass so viel Abwasser wie möglich über die KA gereinigt wird. Aufgrund der Simulationsergebnisse wird ein Optimierungspotenzial am Zulauf der KA deutlich, da die maximal zulässige Zulaufmenge (Nümbrecht plus Waldbröl) nicht erreicht wird. Für die Umsetzung der Regelung in Stufe 2 wird dieses Potenzial mit aufgenommen und eine zusätzliche Strangregelung entwickelt.

Festzustellen ist, dass die Entlastungsraten im gesamten Kanalnetz deutlich unter den Wasserrechtlichen Vorgaben liegen.

### 18.3 Auswertung Regler Stufe 2 - Fracht-/Konzentrations-Regler (Sommer- und Winterbetrieb)

Zur Entwicklung des fracht- bzw. konzentrationsorientierten Reglers in Stufe 2 werden Ereignisse aus einem Zeitraum ausgewählt, in dem im Kanalnetz Homburg-Bröl noch keine Regler aktiv sind. Es werden vier verschiedene Ereignisse mittels Simulation nachgebildet und anschließend jeweils der hydraulisch vergleichmäßigende Regler in Stufe 1, der frachtabhängige Regler im Winterbetrieb und der konzentrationsabhängige Regler im Sommerbetrieb eingeschaltet (beides Stufe 2), um so das Verhalten und die Entlastungswassermengen vergleichen zu können. Dazu werden zahlreiche Niederschlagsereignisse ausgewertet wovon hier drei exemplarisch vorgestellt werden: Ein 1-jährliches, ein 2-jährliches und ein 5-jährliches Ereignis. Stufe 2 arbeitet mit den im Regelungssystem hinterlegten Tagesgangkurven für Ammoniumstickstoff.

Die in Stufe 2 neu umgesetzte Strangregelung wird in diesen Auswertungen nicht berücksichtigt, um Stufe 1 und Stufe 2 besser vergleichen zu können.

**Tabelle 26: Ausgewertete Ereignisse**

Ereignis	Zeitraum	Jährlichkeit
Szenario 1	21.06.2007 – 28.06.2007	1-jährlich
Szenario 2	15.01.2007 – 23.01.2007	2-jährlich
Szenario 3	15.08.2007 – 20.08.2007	5-jährlich

In Abbildung 232 sind für das 1-jährliche Ereignis die Gesamtentlastungsmengen dargestellt, mit hydraulisch vergleichmäßigendem Regler (Stufe 1, grüner Balken), mit frachtabhängigem Regler im Winterbetrieb (Stufe 2, blauer Balken) und mit konzentrationsabhängigem Regler im Sommerbetrieb (Stufe 2, roter Balken).

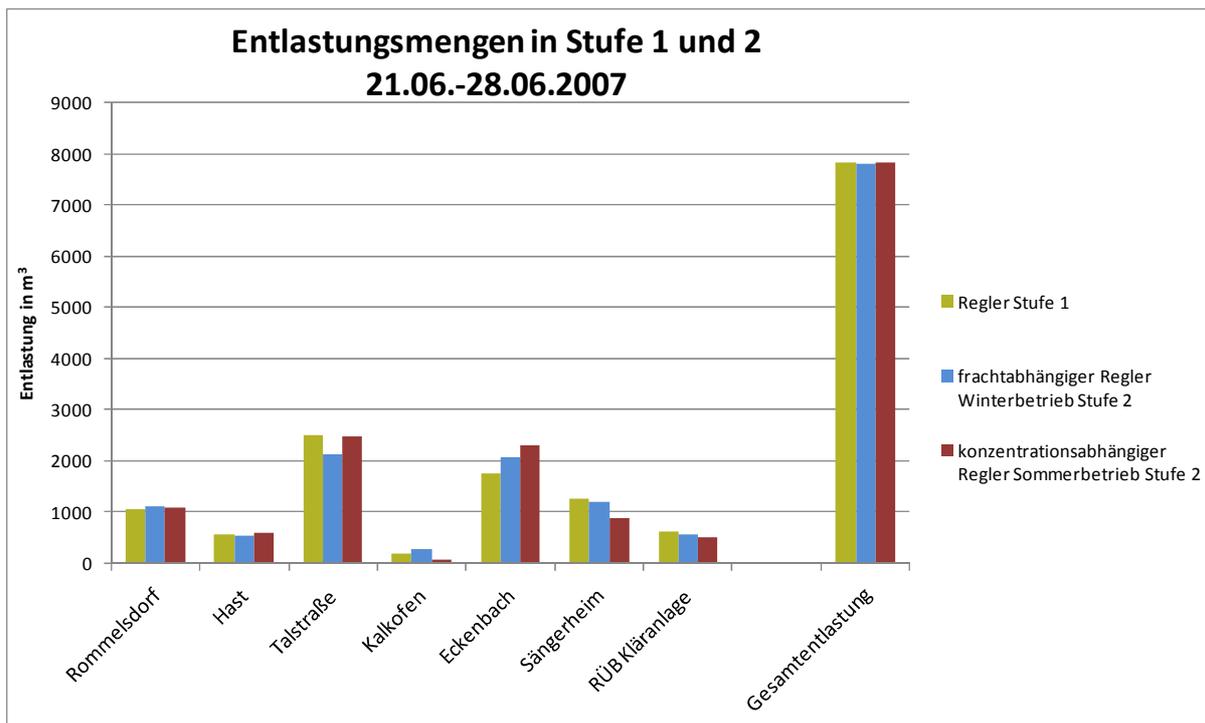


Abbildung 232: Gesamtentlastungsmengen 1- jährliches Ereignis

Die Gesamtentlastungsmenge unter Einsatz von Stufe 1 wird durch Einsatz des fracht- bzw. konzentrationsabhängigen Reglers teilweise leicht unterschritten (Tabelle 27).

Tabelle 27: Vergleich der Reglerstufen 1&2

	Gesamtentlastungen	Veränderung
Regler Stufe 1	7.829 m <sup>3</sup>	
frachtabhängiger Regler Winterbetrieb Stufe 2	7.802 m <sup>3</sup>	-0,34%
konzentrationsabhängiger Regler Sommerbetrieb Stufe 2	7.826 m <sup>3</sup>	-0,04%

Die Änderungen bei der Gesamtentlastung sind jedoch so gering, dass sie vernachlässigt werden können. Interessant ist hier die unterschiedliche Verteilung der Wassermengen bzw. Entlastungen in Stufe 2 im Sommer- und Winterbetrieb auf die verschiedenen RÜB.

Diese Änderungen der Entlastungswassermengen, die durch den fracht- bzw. konzentrationsabhängigen Regler hervorgerufen werden, sind in Abbildung 233 dargestellt. Hier werden im Winterbetrieb bei den zu schützenden Einleitungsstellen an den Becken der Kläranlage, Hast und Talstraße die Entlastungen reduziert. Im Sommerbetrieb werden die Immissionsstellen an den Becken Kalkofen, RÜB KA und Sängerheim verstärkt geschützt.

Hinweis: Mit einer optimalen, theoretischen Strangregelung, die eine Drosselwassermenge am RÜB Kläranlage von 150 l/s zulassen würde, kann in der Simulation nachgewiesen werden, dass das Becken RÜB Kläranlage in diesem Szenario in Stufe 2 keine Entlastung hat. Durch die vorhandene Einbaugröße des IDM (Durchmesser) sind z.Z. jedoch nur 120 l/s Durchfluss möglich.

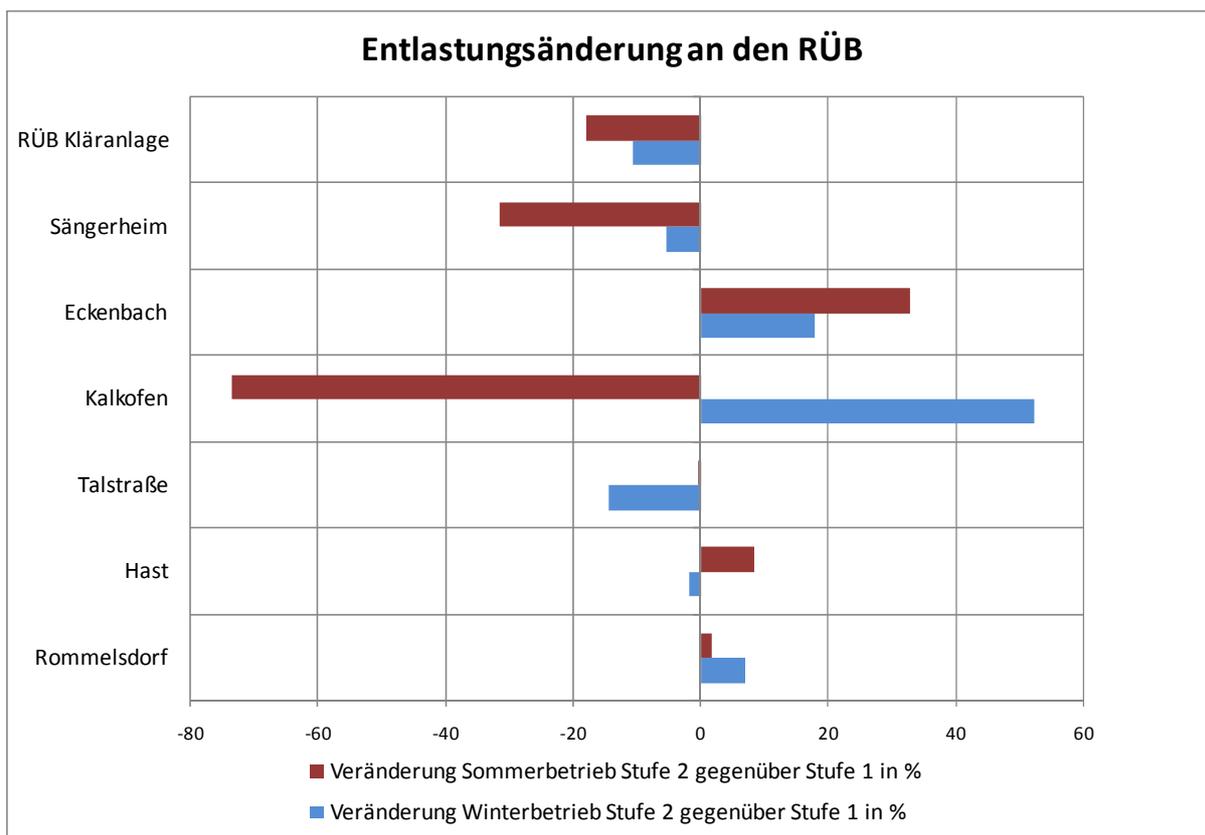


Abbildung 233: Vergleich der Regler Stufe 1&2 für ein 1-jährliches Ereignis

Im Folgenden werden zwei weitere Szenarien ausgewertet die anhand von anderen Regenereignissen, aber unter den gleichen (oben beschriebenen) Bedingungen, ermittelt werden.

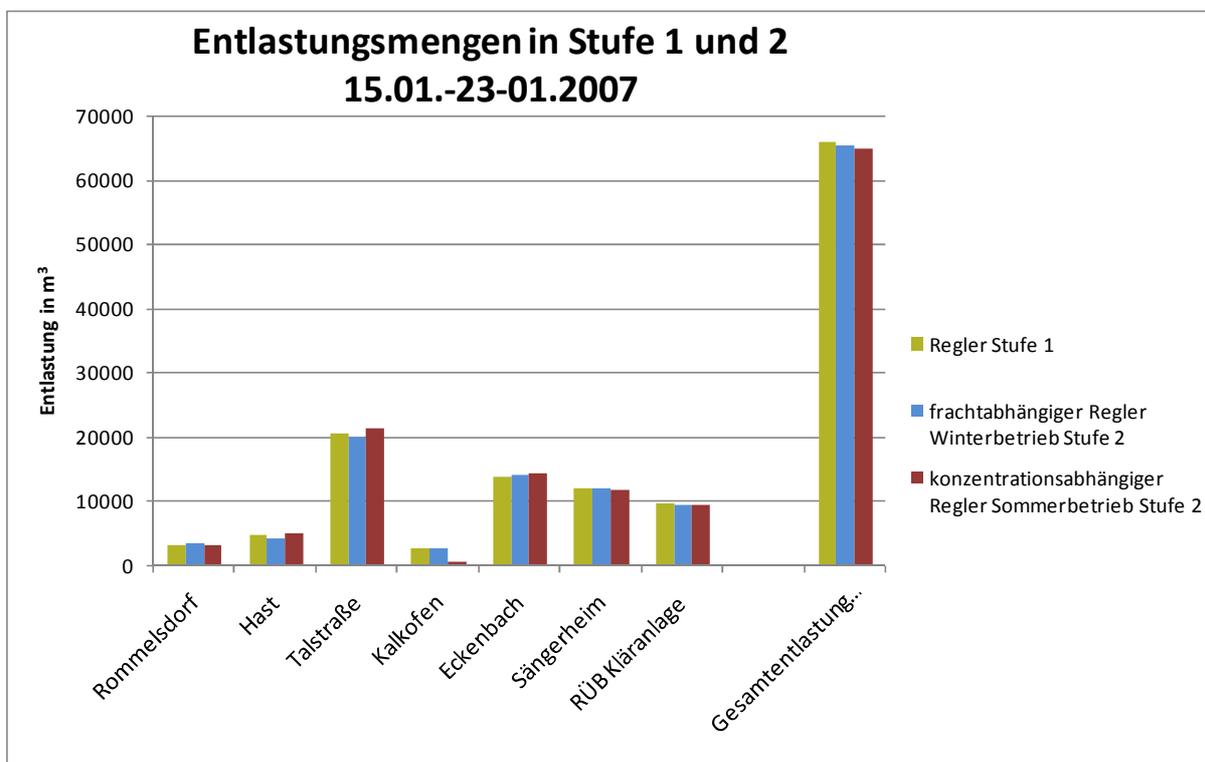


Abbildung 234: Gesamtentlastungsmengen 2-jährliches Ereignis

Auffällig sind die hohen Entlastungswassermengen des RÜB Talstraße, gegenüber den anderen RÜB. Dies ist durchgängig in allen drei Szenarien zu beobachten. Umso wichtiger ist es daher das Gewässer an diesem Becken zu schützen. Wie Abbildung 235 zeigt, erwirkt die Stufe 2 im Winterbetrieb eine Entlastungsreduzierung am RÜB Talstraße, indem mehr Wasser zum RÜB Kalkofen geleitet wird.

Tabelle 28: Vergleich Stufe 1&2 für ein 2-jährliches Ereignis

	Gesamtentlastungen	Veränderung
Regler Stufe 1	65.829 m <sup>3</sup>	
frachtabhängiger Regler Winterbetrieb Stufe 2	65.323 m <sup>3</sup>	-0,77%
konzentrationsabhängiger Regler Sommerbetrieb Stufe 2	64.879 m <sup>3</sup>	-1,44%

Auch bei diesem Szenario weichen die Gesamtentlastungsmengen um maximal 1,44% ab. Das bedeutet in Stufe 2 eine Reduzierung von 950 m<sup>3</sup> gegenüber Stufe 1. Interessant ist in Stufe 2 jedoch nicht die Gesamtentlastungsmenge, sondern die Einflussmöglichkeit auf das Kanalnetz im Sommer sowie im Winter. In der folgenden Grafik sind wieder die Veränderungen in Stufe 2 gegenüber der Stufe 1 zu erkennen. Die hohen prozentualen Änderungen am RÜB Kalkofen liegen an der geringen Entlastungsmenge. In Stufe 1 wird am RÜB Kalkofen 2.524 m<sup>3</sup> und in Stufe 2 (Sommer) nur 411 m<sup>3</sup> entlastet. In diesem Einzelfall entspricht das einer Reduzierung von über 80%.

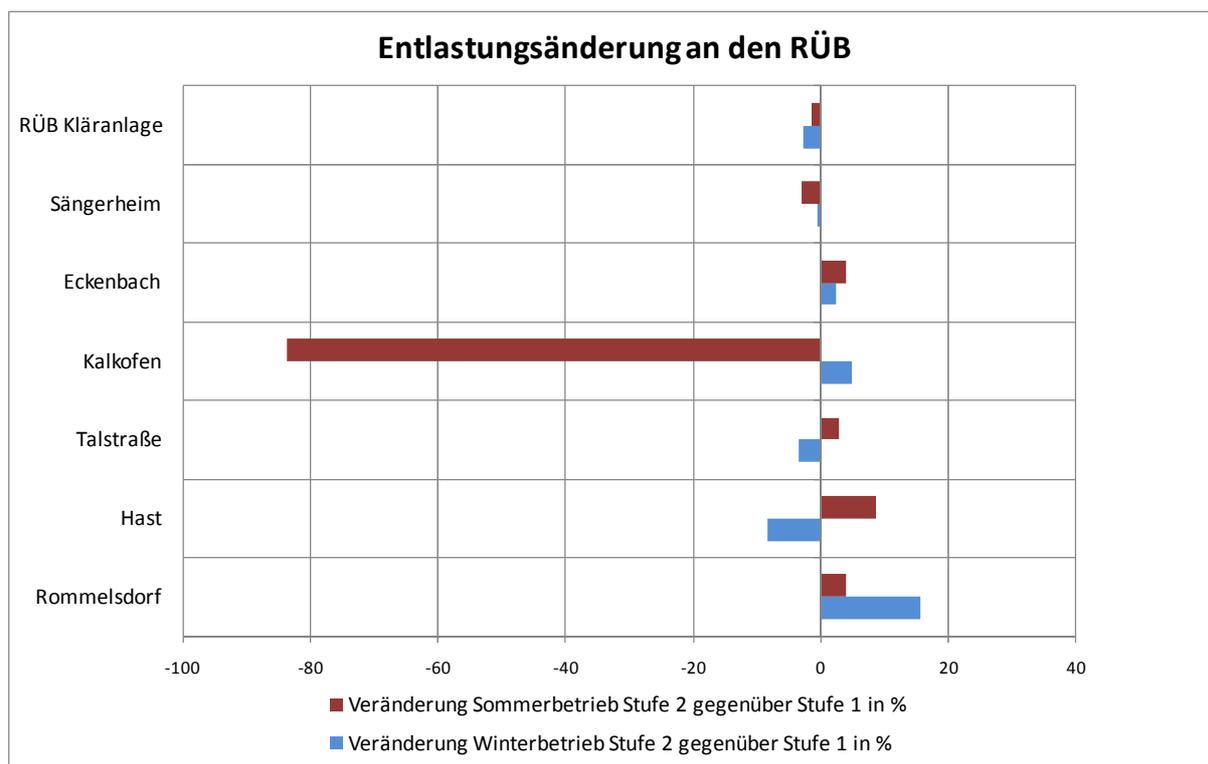


Abbildung 235: Vergleich der Regler Stufe 1&2 für ein 2-jährliches Ereignis

Es folgt noch ein weiteres Beispiel mit einem 5-jährlichen Regenszenario aus dem August 2007.

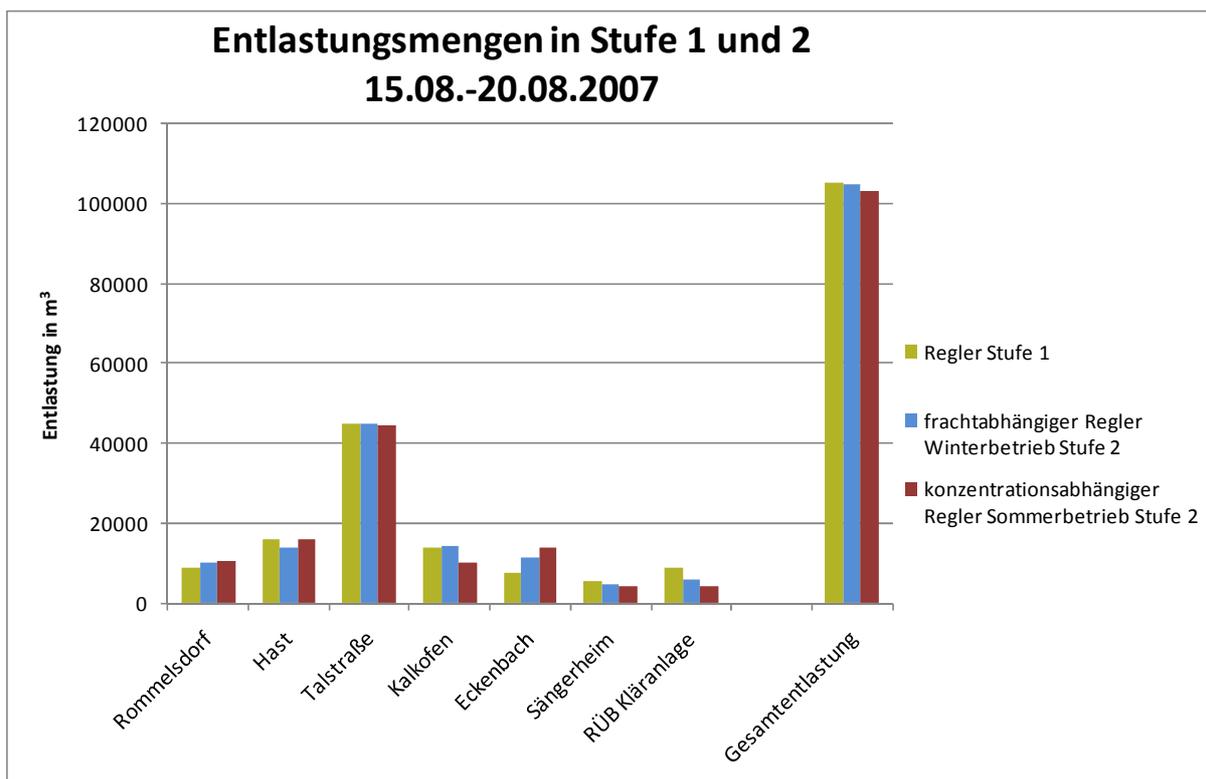


Abbildung 236: Gesamtentlastungsmengen 5-jährliches Ereignis

Die entlasteten Wassermengen sind entsprechend dem 5-jährlichen Ereignis höher als in den zuvor betrachteten Regenszenarien. Das Verhalten ist in den beiden Stufen 1 und 2 jedoch vergleichbar.

Tabelle 29: Vergleich Stufe 1&2 für ein 5-jährliches Ereignis

	Gesamtentlastungen	Veränderung
Regler Stufe 1	105.261 m <sup>3</sup>	
frachtabhängiger Regler Winterbetrieb Stufe 2	104.905 m <sup>3</sup>	-0,34%
konzentrationsabhängiger Regler Sommerbetrieb Stufe 2	103.399 m <sup>3</sup>	-1,77%

Auch in diesem Szenario weichen die Gesamtentlastungsmengen zwischen Stufe 1 und 2 nur marginal voneinander ab. Im Sommerbetrieb wird gegenüber Stufe 1 noch mal eine Reduzierung um 1,77% erreicht.

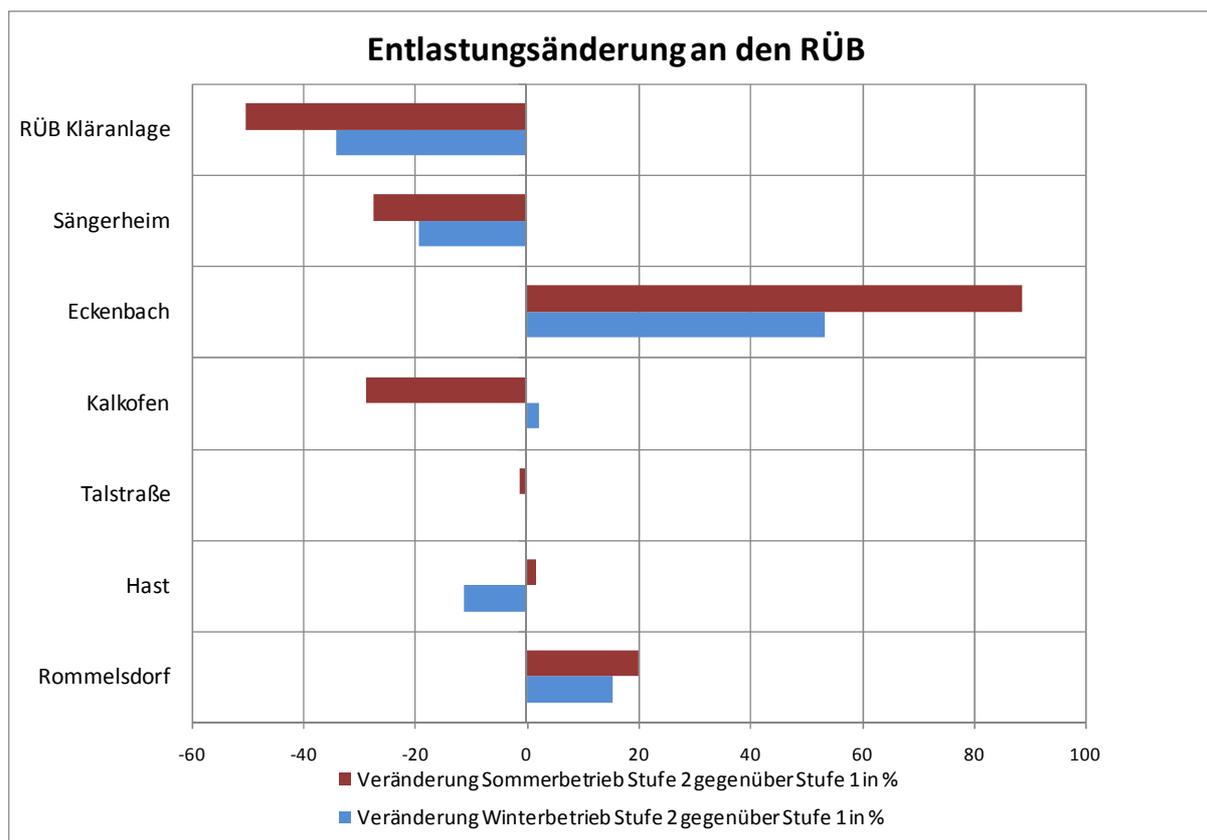


Abbildung 237: Vergleich der Regler Stufe 1&2 für ein 5-jährliches Ereignis

Das RÜB Eckenbach hat in allen drei Szenarien in Stufe 2, im Sommer- und Winterbetrieb, erhöhte Entlastungsmengen gegenüber Stufe 1. Da sich dieses RÜB weit entfernt von den Lachslachgebieten befindet und eine vergleichsweise niedrige  $\text{NH}_4\text{-N}$  Konzentration aufweist, wird der Bachlauf wie vorgesehen, im Sommer sowie im Winter an diesem Becken weniger geschützt als an anderen Stelle. Dafür wird der Bachlauf an dem RÜB der Kläranlage und am RÜB Sängersheim geschützt, wie es in Stufe 2 vorgegeben wird. Diese drei Becken liegen im Strang Nümbrecht. Die entlastete Wassermenge wird zwar in der Summe in Stufe 2 gegenüber Stufe 1 nicht wesentlich verringert, aber intelligenter im Netz verteilt.

Als zusätzliche Auswertung wird das Jahr 2009 mit Einsatz der Regelung in Stufe 2 simuliert, einmal mit den neuen genehmigten Drosselwassermengen (Netzplan-Prognose 2012) und zum anderen mit den niedrigeren Drosselmengen vom Projektbeginn.

Tabelle 30: Simulation des Kanalnetzes für 2009 in Stufe 2

2009	Sim mit Regler Stufe 2 Drosselwassermengen Plan 2012	Sim mit Regler Stufe 2 Drosselwassermengen Plan 2005
Entlastungen im Kanalnetz	140.249 m <sup>3</sup>	220.810 m <sup>3</sup>
Fracht $\text{NH}_4\text{-N}$	461 kg	635 kg
Fracht CSB	9.565 kg	13.455 kg

Der Tabelle 30 ist zu entnehmen, dass mit erhöhten Drosselwassermengen wesentlich höhere Reduzierungen in Bezug auf Frachten und Wassermengen erzielt werden können. Es ist also sinnvoll nicht

nur eine Steuerung bzw. Regelung des Abwassersystems einzuführen, es sollte auch über die Möglichkeit nachgedacht werden die hydraulischen Kapazitäten voll auszuschöpfen.

Außerdem kann mit der gezielten Ausrichtung des fracht- bzw. konzentrationsabhängigen Reglers im Sommer wie auch im Winter gezielt Stellen am Bachlauf geschützt werden. Dies ermöglicht eine noch optimalere Auslegung des Gesamtsystems und einen gezielten Schutz des Lachslaichgewässers.

## 18.4 Auswertung Stufe 3 - Regelung nach NH<sub>4</sub>-N-Online-Messungen im Vergleich mit Stufe 1 + 2

Für eine Übersicht der Effektivität der drei Regelungsstufen wird in der Simulation eine Langzeituntersuchung durchgeführt. Zuerst werden für das Jahr 2009 alle drei Stufen mit einem unregulierten Kanalnetz verglichen. Es werden dabei die gesamten Entlastungen (Tabelle 31), Ammonium-Stickstofffrachten (Tabelle 32) und CSB-Frachten (Tabelle 33) für alle RÜB bestimmt. Zusätzlich können die reduzierten Frachtmengen für das Gesamtsystem „Kanalnetz und Kläranlage“ errechnet werden (Tabelle 34).

Die hier dargestellten Werte für die Entlastungen sind Ergebnisse der Simulation. Die Frachtmengen werden aus diesen Simulationswerten berechnet. Dabei sind Messwerte und das daraus bestimmte Perzentil (85%) für NH<sub>4</sub>-N und CSB zu Grunde gelegt (siehe Tabelle 18 und Tabelle 19).

**Tabelle 31: Entlastungsmengen für das Jahr 2009**

RÜB 2009	Sim ohne Regler	Sim Regler Stufe 1	Sim Regler Stufe 2	Sim Regler Stufe 3
Eckenbach	22.095 m <sup>3</sup>	17.007 m <sup>3</sup>	23.082 m <sup>3</sup>	23.082 m <sup>3</sup>
Sängerheim	14.295 m <sup>3</sup>	18.531 m <sup>3</sup>	17.019 m <sup>3</sup>	17.019 m <sup>3</sup>
Kläranlage	29.133 m <sup>3</sup>	16.836 m <sup>3</sup>	12.795 m <sup>3</sup>	12.795 m <sup>3</sup>
Rommelsdorf	80.820 m <sup>3</sup>	9.523 m <sup>3</sup>	11.980 m <sup>3</sup>	17.030 m <sup>3</sup>
Hast	5.641 m <sup>3</sup>	10.163 m <sup>3</sup>	8.340 m <sup>3</sup>	22.523 m <sup>3</sup>
Talstraße	60.079 m <sup>3</sup>	83.693 m <sup>3</sup>	64.714 m <sup>3</sup>	59.547 m <sup>3</sup>
Kalkofen	1.226 m <sup>3</sup>	1.400 m <sup>3</sup>	2.319 m <sup>3</sup>	4.191 m <sup>3</sup>
Entl. Gesamt	213.289 m <sup>3</sup>	157.153 m <sup>3</sup>	140.249 m <sup>3</sup>	156.187 m <sup>3</sup>
Reduzierung		26 %	34 %	27 %

Die rein hydraulische Auswertung der drei Stufen zeigt für das Jahr 2009 eine Reduzierung der Entlastungen von bis zu 34% für das gesamte Kanalnetz Homburg-Bröl. Das entspricht einer Wassermenge von 73.000 m<sup>3</sup>, die zur Kläranlage weitergeleitet wird, dort biologisch behandelt und nicht über die RÜB ins Gewässer geleitet wird. Die Stufe 2 zeigt das beste Ergebnis gefolgt von Stufe 3, die mit 27% ein ähnlich gutes Ergebnis erzielt wie Stufe 1 mit 26%.

Der Unterschied zwischen Stufe 1 und 2 ist dadurch zu erklären, dass Verbesserungen, die sich aus dem praktischen Betrieb von Stufe 1 ergeben, in die Entwicklung und Umsetzung von Stufe 2 eingehen. Dazu gehört auch die Strangregelung der Teilstränge Nümbrecht und Waldbröl.

Stufe 2 kann gegenüber Stufe 3 sieben Prozent mehr in der Entlastung reduzieren, was darauf zurückzuführen ist, dass in Stufe 3 die Zielvorgabe für die Regelung eine andere ist als für Stufe 2. Stufe 3 wird daraufhin optimiert, Frachten bzw. Konzentrationsspitzen zurück zu halten, unabhängig von der hydraulischen Entlastungsmenge.

**Tabelle 32: Frachtmengen Ammonium-Stickstoff für 2009**

RÜB 2009	Sim ohne Regler	Sim Regler Stufe 1	Sim Regler Stufe 2	Sim Regler Stufe 3
Eckenbach	90 kg	69 kg	94 kg	94 kg
Sängerheim	54 kg	70 kg	64 kg	64 kg
Kläranlage	115 kg	66 kg	50 kg	50 kg
Rommelsdorf	152 kg	18 kg	23 kg	32 kg
Hast	19 kg	34 kg	28 kg	75 kg
Talstraße	180 kg	250 kg	193 kg	178 kg
Kalkofen	4 kg	5 kg	8 kg	15 kg
Frachten Ges. NH <sub>4</sub> -N	614 kg	512 kg	460 kg	508 kg
Reduzierung		17 %	25 %	17 %

**Tabelle 33: Frachtmengen CSB für 2009**

RÜB 2009	Sim ohne Regler	Sim Regler Stufe 1	Sim Regler Stufe 2	Sim Regler Stufe 3
Eckenbach	1.642 kg	1.264 kg	1.715 kg	1.715 kg
Sängerheim	1.082 kg	1.402 kg	1.288 kg	1.288 kg
Kläranlage	1.894 kg	1.094 kg	832 kg	832 kg
Rommelsdorf	3.601 kg	424 kg	534 kg	759 kg
Hast	402 kg	725 kg	595 kg	1.606 kg
Talstraße	4.190 kg	5.837 kg	4.513 kg	4.153
Kalkofen	47 kg	53 kg	89 kg	160 kg
Frachten Ges. CSB	12.858 kg	10.799 kg	9.566 kg	10.513 kg
Reduzierung		16 %	26 %	18 %

In den Auswertungen der drei vorangegangenen Tabellen ist gut zu erkennen, dass der Regler Stufe 3 nur für den Strang Waldbröl umgesetzt wurde. Die Ergebnisse für den Strang Nümbrecht sind in Stufe 2 und 3 identisch, da hier jeweils Stufe 2 aktiv ist.

Auch hier hat die Stufe 2 das beste Ergebnis mit einer Einsparung von 25% Ammonium-Stickstoff und 26% CSB gegenüber einem unregulierten Systemzustand. Dies ist vor allem auf die Frachtreduzierung durch die erhöhte Wassermenge (73.000 m<sup>3</sup>) zurückzuführen, die in dieser Stufe zur Kläranlage weitergeleitet und nicht wie bei den anderen Stufen in das Gewässer entlastet wird. Dass die Stufe 3 gegenüber Stufe 1 nur ein gering besseres Ergebnis erzielt ist durch die unterschiedlichen Zielgrößen in Stufe 3 begründet. Der Regler für Stufe 3 optimiert das System abhängig der gemessenen Konzentrationen.

rationen in den RÜB. Erst wenn drei RÜB zeitgleich entlasten, werden die Frachten in der Entlastung berücksichtigt. Daher liegt die Zielgröße überwiegend in der Vermeidung von Konzentrationsspitzen, die in das Gewässer geleitet werden. Die Vermeidung von Konzentrationsspitzen kann durch die Ergebnisse in den Tabellen nicht wieder gegeben werden und es sind weitere Auswertungen notwendig. Als Beispiel hierfür wird in der folgenden Grafik der Verlauf einer  $\text{NH}_4\text{-N}$  Konzentration in der Entlastung am RÜB Talstraße für alle drei Stufen der Regelung gegenübergestellt. Die Frachtverläufe werden auf der Basis von im System hinterlegten, durchschnittlichen  $\text{NH}_4\text{-N}$  Tagesgängen simuliert. Der Verlauf der Konzentration ist für Stufe 1 + 2 nahezu identisch, Stufe 3 zeigt deutlich reduzierte Werte.

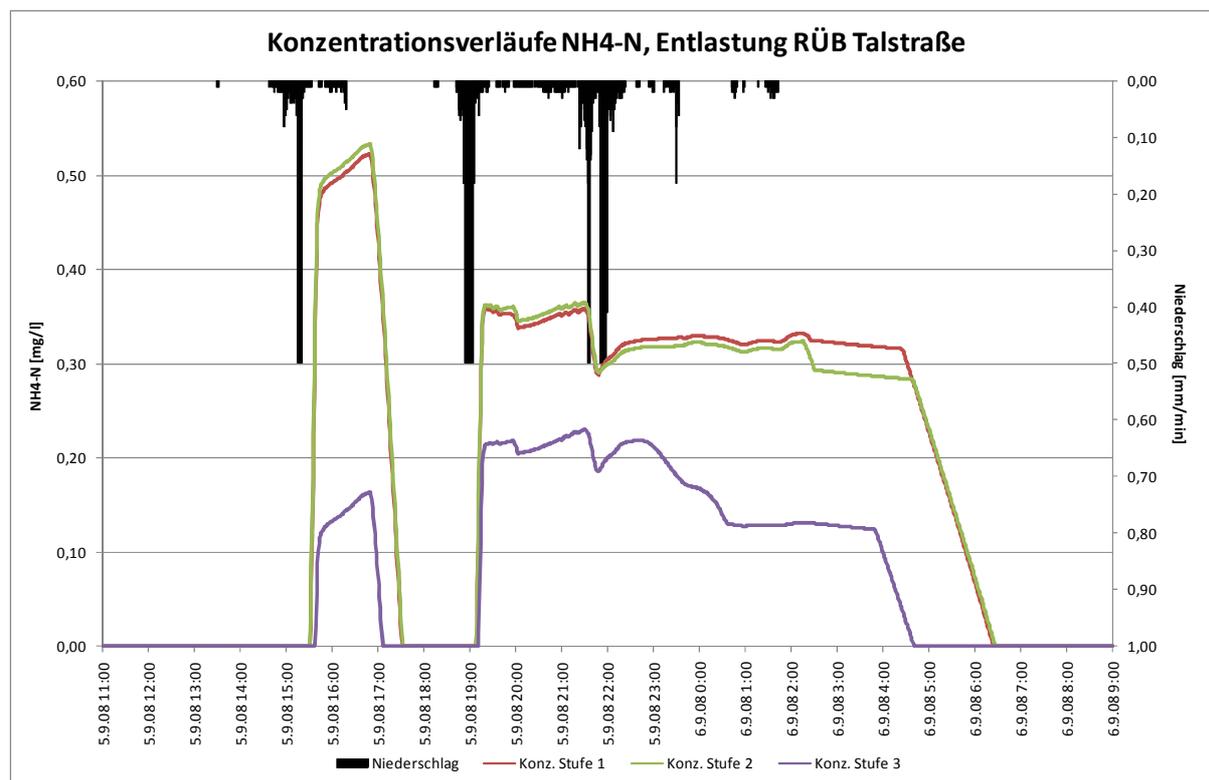


Abbildung 238: Vergleich Konzentrationsverlauf  $\text{NH}_4\text{-N}$  mit allen drei Stufen

Tabelle 34 zeigt die Jahresauswertung 2009 für das gesamte System und beinhaltet den Kläranlagenablauf und die Entlastungen der RÜB. Ausgewertet werden die  $\text{NH}_4\text{-N}$  und CSB Frachten. Auch hier hat die Stufe 2 das beste Ergebnis. Im Vergleich zum unregulierten Zustand wird das Gewässer in 2009 jeweils um 1,3 Tonnen Fracht an  $\text{NH}_4\text{-N}$  und CSB entlastet.

Tabelle 34: Reduzierte Frachtmengen für das Gesamtsystem in 2009, KA und Kanalnetz

2009	Sim ohne Regler	Sim mit Regler Stufe 1	Sim mit Regler Stufe 2	Sim mit Regler Stufe 3
<b><math>\text{NH}_4\text{-N}</math> Fracht alle RÜB</b>	614 kg	512 kg	460 kg	508 kg
<b><math>\text{NH}_4\text{-N}</math> Fracht KA</b>	1.097 kg	1.113 kg	1.118 kg	1.114 kg
<b>Fracht Gesamt <math>\text{NH}_4</math></b>	<b>1.711 kg</b>	<b>1.625 kg</b>	<b>1.578 kg</b>	<b>1.622 kg</b>
<b>Reduzierung</b>		86 kg	133 kg	89 kg
		<b>5,03%</b>	<b>7,77%</b>	<b>5,20%</b>

<b>CSB Fracht alle RÜB</b>	12.858 kg	10.799 kg	9.566 kg	10.513 kg
<b>CSB Fracht KA</b>	97.796 kg	99.278 kg	99.728 kg	99.302 kg
<b>Fracht Gesamt CSB</b>	<b>110.654 kg</b>	<b>110.077 kg</b>	<b>109.294 kg</b>	<b>109.815 kg</b>
<b>Reduzierung</b>		577 kg	1.360 kg	839 kg
		<b>0,52%</b>	<b>1,23%</b>	<b>0,76%</b>

Zusätzlich zum Jahr 2009 wird der Zeitraum 2008 bis einschließlich 2010 simuliert und ausgewertet. Die Ergebnisse in den folgenden Tabellen zeigen ein ähnliches Ergebnis wie bereits für das Jahr 2009. Mit der Regelung in Stufe 2 können die Entlastungen um 24% und die Frachten um 18% NH<sub>4</sub>-N bzw. 19% CSB reduziert werden. Es ist an dieser Stelle anzumerken, dass auch der Regler in Stufe 3 gute Werte erreicht und die Zielsetzung – Schutz des Gewässers vor Konzentrationsspitzen aus dem Niederschlagsabflusssystem – durch die Auswertungen in den Tabellen nicht wiedergegeben werden kann.

**Tabelle 35: Entlastungsmengen für das Jahr 2008-2010**

RÜB 2008-2010	Sim ohne Regler	Sim Regler Stufe 1	Sim Regler Stufe 2	Sim Regler Stufe 3
Eckenbach	132.353 m <sup>3</sup>	100.883 m <sup>3</sup>	127.066 m <sup>3</sup>	127.066 m <sup>3</sup>
Sängerheim	62.664 m <sup>3</sup>	80.119 m <sup>3</sup>	70.801 m <sup>3</sup>	70.801 m <sup>3</sup>
Kläranlage	129.114 m <sup>3</sup>	107.017 m <sup>3</sup>	91.883 m <sup>3</sup>	91.883 m <sup>3</sup>
Rommelsdorf	224.949 m <sup>3</sup>	45.725 m <sup>3</sup>	54.371 m <sup>3</sup>	77.922 m <sup>3</sup>
Hast	36.704 m <sup>3</sup>	51.313 m <sup>3</sup>	46.830 m <sup>3</sup>	130.793 m <sup>3</sup>
Talstraße	307.796 m <sup>3</sup>	351.613 m <sup>3</sup>	277.161 m <sup>3</sup>	228.457 m <sup>3</sup>
Kalkofen	7.454 m <sup>3</sup>	8.949 m <sup>3</sup>	14.292 m <sup>3</sup>	36.489 m <sup>3</sup>
<b>Entl. Gesamt</b>	<b>901.034 m<sup>3</sup></b>	<b>745.619 m<sup>3</sup></b>	<b>682.404 m<sup>3</sup></b>	<b>761.411 m<sup>3</sup></b>
<b>Reduzierung</b>		<b>17 %</b>	<b>24 %</b>	<b>16 %</b>

**Tabelle 36: Frachtmengen Ammonium-Stickstoff für 2008-2010**

RÜB 2008-2010	Sim ohne Regler	Sim Regler Stufe 1	Sim Regler Stufe 2	Sim Regler Stufe 3
Eckenbach	540 kg	412 kg	519 kg	519 kg
Sängerheim	236 kg	302 kg	267 kg	267 kg
Kläranlage	509 kg	422 kg	362 kg	362 kg
Rommelsdorf	423 kg	86 kg	102 kg	146 kg
Hast	123 kg	171 kg	156 kg	437 kg
Talstraße	920 kg	1.051 kg	829 kg	683 kg
Kalkofen	26 kg	32 kg	51 kg	129 kg
<b>Fracht Ges.</b>	<b>2.777 kg</b>	<b>2.476 kg</b>	<b>2.286 kg</b>	<b>2.543 kg</b>

NH <sub>4</sub> -N				
Reduzierung		11 %	18 %	8 %

Tabelle 37: Frachtmengen CSB für 2008-2010

RÜB 2008-2010	Sim ohne Regler	Sim Regler Stufe 1	Sim Regler Stufe 2	Sim Regler Stufe 3
Eckenbach	9.834 kg	7.496 kg	9.446 kg	9.447 kg
Sängerheim	4.742 kg	6.063 kg	5.364 kg	5.360 kg
Kläranlage	8.392 kg	6.956 kg	5.972 kg	5.979 kg
Rommelsdorf	10.021 kg	2.037 kg	2.422 kg	3.471 kg
Hast	2.617 kg	3.659 kg	3.339 kg	9.326 kg
Talstraße	21.466 kg	24.521 kg	19.329 kg	15.933 kg
Kalkofen	285 kg	342 kg	546 kg	1.393 kg
Frachten Ges. CSB	57.357 kg	51.074 kg	46.418 kg	50.909 kg
Reduzierung		11 %	19 %	11 %

Tabelle 38: Reduzierte Frachtmengen für das Gesamtsystem in 2008-2010, KA und Kanalnetz

2008-2010	Sim ohne Regler	Sim mit Regler Stufe 1	Sim mit Regler Stufe 2	Sim mit Regler Stufe 3
NH <sub>4</sub> -N Fracht alle RÜB	2.777 kg	2.476 kg	2.286 kg	2.544 kg
NH <sub>4</sub> -N Fracht KA	3.332 kg	3.378 kg	3.397 kg	3.373 kg
Fracht Gesamt NH4	6.109 kg	5.854 kg	5.683 kg	5.917 kg
Reduzierung		255 kg	426 kg	192 kg
		4,17%	6,97%	3,14%
CSB Fracht alle RÜB	57.357 kg	51.074 kg	46.418 kg	50.908 kg
CSB Fracht KA	297.120 kg	301.212 kg	302.875 kg	300.793 kg
Fracht Gesamt CSB	354.477 kg	352.286 kg	349.293 kg	351.701 kg
Reduzierung		2.191 kg	5.184 kg	2.776 kg
		0,62%	1,46%	0,78%

Für einen vollständigen Überblick werden in der Tabelle 39 die gesamten Wassermengen aus den Ergebnissen der Simulation für 2008-2010 aufgeführt. Die ins Gewässer entlasteten Wassermengen sind mit 682.542 m<sup>3</sup> in Stufe 2 um 218.492 m<sup>3</sup> geringer, bezogen auf den unregulierten Zustand. Diese reduzierten Wassermengen werden über die Kläranlage geleitet und dort biologisch behandelt. Daher sind die Gesamtwassermengen in allen vier simulierten Szenarien mit ca. 12.185.500 nahezu

identisch. Die Bilanzierung der gesamten Wassermengen im System gewährleistet die Vergleichbarkeit der vorangegangenen Ergebnisse.

**Tabelle 39: Wassermengen Gesamtsystem 2008-2010, KA und Kanalnetz**

2008-2010	Entlastung	Ablauf Kläranlage	Gesamte Wassermenge
ohne Regler	901.034 m <sup>3</sup>	11.284.477 m <sup>3</sup>	12.185.511 m <sup>3</sup>
Stufe 1	745.619 m <sup>3</sup>	11.439.867 m <sup>3</sup>	12.185.486 m <sup>3</sup>
Stufe 2	682.542 m <sup>3</sup>	11.503.048 m <sup>3</sup>	12.185.452 m <sup>3</sup>
Stufe 3	761.612 m <sup>3</sup>	11.423.975 m <sup>3</sup>	12.185.386 m <sup>3</sup>

## 19 Kostenermittlung und Vergleich der Alternativen (Regelungsstufen)

Im Projekt werden drei Stufen für den Betrieb und die Regelung des Abwassersystems umgesetzt. Der Arbeitsaufwand, die technische Grundausstattung und die Personalkosten unterscheiden sich dabei deutlich voneinander. In der folgenden Matrix ist der zu berücksichtigende Aufwand für die Stufen 1 bis 3 aufgeführt aus dem sich die Kosten dementsprechend zusammensetzen:

Aufstellung Kostenrelevanter Punkte		Für Stufenbetrieb erforderlich		
		1	2	3
<b>1</b>	<b>Analytik</b>			
	<b>Parameter</b>			
	Ammonium, abfiltrierbare Stoffe, CSB		X	X
	pH-Wert, Temperatur		X	X
	Niederschlag	X	X	X
	<b>Online</b>			
	Analyser, ISE Sensoren		X	X
	Analyser Verbrauchsmaterial		X	X
	Sonde mit Messumformer		X	X
	dto Verbrauchsmaterial		X	X
	Kompressor		X	X
	SSCAN, optischer Sensor		X	X
	Messgerät für pH-Wert und Temperatur		X	X
	Niederschlagsmessgerät	X	X	X
<b>2</b>	<b>Bestandsaufnahme</b>			
	<b>Bauwerke</b>			
	Bestandspläne Bauwerke	X	X	X
	<b>Kanalnetz</b>			
	Kenndaten Kanalnetz (auch Kommunen)	X	X	X
<b>3</b>	<b>RÜB Einrichtung</b>			
	<b>Messungen vor Ort</b>			
	Qd (IDM), Füllstand Becken	X	X	X
	Entlastung ein, Entlastungsmenge	X	X	X
<b>4</b>	<b>Probenbereitstellung</b> (Mehrfachnennungen möglich. Situative Abhängigkeiten)			
	<b>Entnahme für Onlinemessung</b>			
	Pumpe, Messgerinne, Leerrohre zum Kanal			X
	Probenentnahmestelle in Druckleitung			X
	<b>Entnahme über Probennehmer</b>			
	Probennehmer		X	



<b>7</b>	<b>Anlagenschutz</b>							
	<b>Einhausung</b>							
		Container, Heizung, Lüftung, Haustechnik						<b>x</b>
<b>8</b>	<b>Rechnermodelle</b>							
		Simulationssoftware (auch Nachweis Netz)				<b>x</b>	<b>x</b>	<b>x</b>
		Modellkalibrierung				<b>x</b>	<b>x</b>	<b>x</b>
<b>9</b>	<b>Sicherheitskonzept</b>							
		USV, USV Anbindung				<b>x</b>	<b>x</b>	<b>x</b>
		EX-Schutz (Konstruktive Umsetzung oder Messung)						<b>x</b>
<b>10</b>	<b>E-Technik</b>							
		Schaltschrank, Einspeisung, SPS mit Systemanbindung				<b>x</b>	<b>x</b>	<b>x</b>
		Messdatenspeicherung				<b>x</b>	<b>x</b>	<b>x</b>
		Ereignisgesteuerte Aktivierung der Probennehmer					<b>x</b>	<b>x</b>
		Spannungsversorgung Container						<b>x</b>
<b>11</b>	<b>Datenanbindung</b>							
	<b>Meldeweg</b>							
		Funk, analoge Standleitung, DSL, GPRS / UMTS				<b>x</b>	<b>x</b>	<b>x</b>
<b>12</b>	<b>Regler</b>							
	<b>Hardware</b>							
		Regler PC oder SPS, Daten PC,				<b>x</b>	<b>x</b>	<b>x</b>
<b>13</b>	<b>Sonstiges</b>							
		Probentransport					<b>x</b>	<b>x</b>
		Fahrzeug (Treibstoff, Versicherung ...)					<b>x</b>	<b>x</b>
		Telefonkosten				<b>x</b>	<b>x</b>	<b>x</b>
		Gebühren Standleitungen, DSL ...				<b>x</b>	<b>x</b>	<b>x</b>
		zusätzlicher Energieaufwand				<b>x</b>	<b>x</b>	<b>x</b>
		Laptop				<b>x</b>	<b>x</b>	<b>x</b>
		Monitor				<b>x</b>	<b>x</b>	<b>x</b>
		Software				<b>x</b>	<b>x</b>	<b>x</b>
<b>14</b>	<b>Personal</b>							
	<b>Einrichtung vor Ort</b>							
		Installation E-Technik (Handwerker)				<b>x</b>	<b>x</b>	<b>x</b>
		Installation Pumpentechnik (Handwerker)						<b>x</b>
		Aufstellung Container (Handwerker)						<b>x</b>
	<b>Betreuung vor Ort</b>							

			Pumpentechnik						X
			Messtechnik					X	X
			Probentransport						X
			<b>Projektarbeit</b>						
			Bestandsaufnahme					X	X
			Kontrolle / Auswertung / Berichtswesen					X	X
			Programmierer SPS					X	X
			Programmierer Regler					X	X

Die technische Grundausstattung für Stufe 1 ist weniger aufwendig als für Stufe 2 und 3, da keine Messungen für Frachtparameter benötigt werden.

Es wird eine Datenverbindung der zu regelnden RÜB und der Kläranlage zu einem zentralen System benötigt. Die Kosten hierfür können sehr unterschiedlich sein, je nachdem ob DSL- oder Standleitungen, Richtfunk- oder Mobilfunksysteme verwendet werden. Abhängig vom Einzugsgebiet, ist es möglich, dass nicht jede dieser genannten Lösungen verfügbar ist.

Die aufzunehmenden Messdaten, wie Durchflussmengen, Füllstände, Niederschlag, Zulauf KA, sind im Projekt KANNST zu einem großen Teil bereits vorhanden.

Weiter sind Aufwendungen für einen Regelungs-PC und einen Daten-PC einzuplanen. Falls vorhanden, kann die Regelung auch auf einem bereits bestehenden SPS-System durchgeführt werden.

Die Stufe 1 kommt ohne großen Wartungsaufwand aus. Wenn das System einmal installiert und in Betrieb ist, sind lediglich Maßnahmen notwendig, wenn sich im Abwassersystem bauliche Änderungen ergeben.

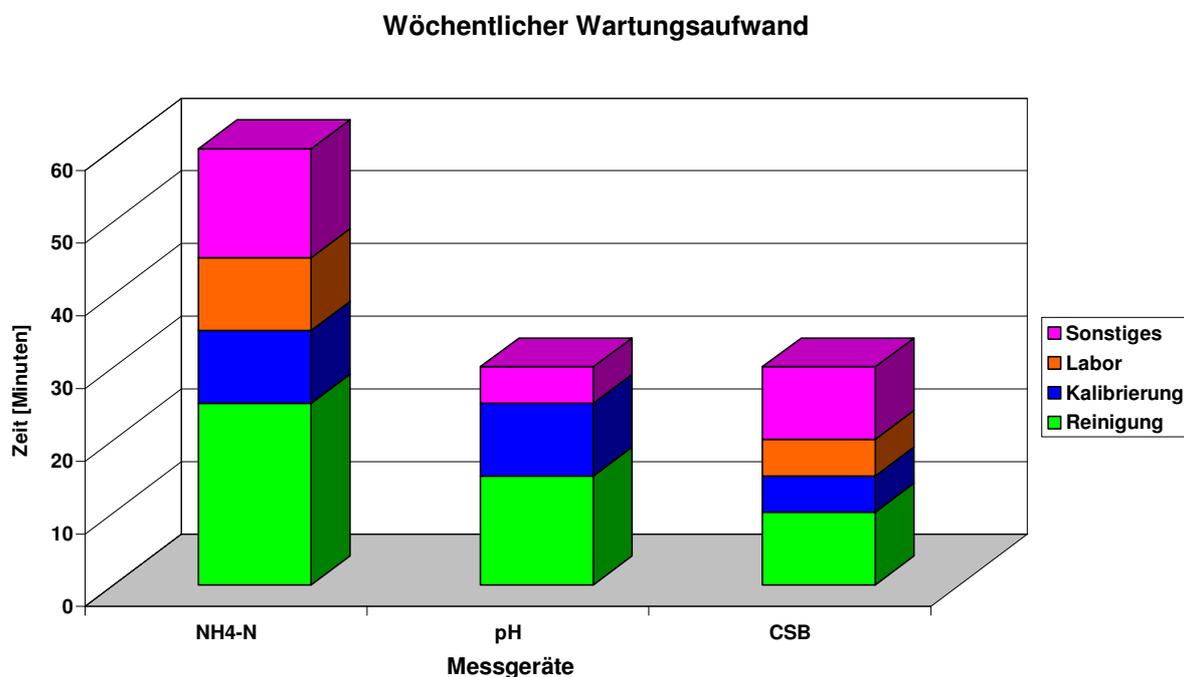
Für die Stufe 2 und 3 sieht das Konzept die Regelung abhängig von Schmutzstoffparametern vor. Im Fall von KANNST, sind für das Kanalnetz die Parameter Ammonium-Stickstoff und CSB sowie pH-Wert und Temperatur vordergründlich zu nennen. Außerdem wird die stoffliche Belastung der Kläranlage sowie des Gewässers betrachtet, dafür sind spezielle Messeinrichtungen notwendig. Die Kläranlage verfügt in der Regel bereits über die notwendige Messtechnik.

Die Errichtung eines Messcontainers für das Kanalnetz ist mit 15T€ bis 20T€ anzusetzen, abhängig unter anderem vom Aufstellungsort, der verwendeten Pumpentechnik und der Anbindung an die PDV. Zusätzlich sind noch Kosten in Höhe von 8T€ bis 25T€ anzusetzen, je nach Ausstattung der gewählten Messtechnik. Stufe 3 benötigt Online-Messgeräte, die in die Regelung eingebunden sind, für Stufe 2 sind automatische Probenehmer ausreichend.

## 19.1 Abschätzung Arbeitsaufwand

Der praktische Einsatz der Messtechnik ist z.T. mit hohem Personalaufwand verbunden und stellt einen bedeutenden Kostenfaktor dar. Im Projekt befinden sich sieben Container mit Messeinrichtungen für  $\text{NH}_4\text{-N}$ , pH-Wert, Temperatur und CSB, die regelmäßig vom Laborpersonal gewartet werden.

Aus den Wartungszeiten, die dafür im Verlauf eines Jahres ermittelt werden, ergibt sich ein Zeitaufwand für die einmalige im Wochenabstand durchgeführte Kalibrierung und Wartung eines Ammoniumstickstoff-Messgeräts (inkl. Temperatur) von ca. einer Stunde und bei einer pH-Wert sowie CSB Messung von jeweils einer halben Stunde.



**Abbildung 239: Abschätzung des wöchentlichen Arbeitsaufwands für die Betreuung der Geräte**

Erläuterung zur Grafik:

**Reinigung:** Dieser Vorgang umfasst die Reinigung der Sonden, die regelmäßig mindestens einmal in der Woche durchgeführt werden.

**Kalibrierung:** Dazu zählen die Kalibrierungsarbeiten, die am Gerät direkt im Container durchgeführt werden, abhängig von Jahreszeiten und dem Zustand des Messgerätes.

**Labor:** Dabei handelt es sich um die Zeit, welche zur Auswertung der Referenzproben im Labor des Aggerverbands benötigt wird. Diese Proben werden im Gerinne entnommen und im Labor analysiert. Für die pH-Messung entfällt diese Bearbeitungszeit komplett, da sie mit Standardflüssigkeiten vor Ort kalibriert wird und somit keine Auswertung von Proben im Labor benötigt wird.

**Sonstiges:** Unter Sonstiges sind alle Arbeiten zusammengefasst, die unerwartet auftreten, z.B. ein unerwarteter Ausfall eines Messgeräts wegen verstopfter Membran. Ein solcher Fehler kann schnell viel Zeit in Anspruch nehmen. Besonders bei empfindlichen Messgeräten, wie bei der Messung von Ammonium, ist dieser Teil mit 25 % der Gesamtzeit im Vergleich zu anderen Messungen relativ hoch. Bei der robusteren pH-Messung fällt er deutlich niedriger aus.

Bei den angegebenen Werten ist zu beachten, dass es sich um Durchschnittswerte handelt, welche von der Witterung abhängig sind. In den Angaben sind die Zeiten für die Fahrten zwischen den Containern und dem Labor nicht enthalten.

Die Aufstellung des Wartungsaufwands zeigt, dass die ISE-Geräte einen höheren Personaleinsatz für die Wartung und Kalibrierung erfordern als die pH-Wert- und die CSB-Sonden. Dagegen stehen die Investitionskosten, die bei dem Spektrometer-Gerät deutlich über den Kosten für die ISE-Sonde liegen. Allerdings stellen die Wartungskosten auf längere Sicht gesehen den deutlich größeren Kostenanteil dar.

## 19.2 Betriebsaufwand Onlinemessungen

Der Betriebsaufwand der Onlinemessungen setzt sich aus den Arbeitszeiten bei der Reinigung und Wartung sowie aus den Kosten für Verbrauchsmaterial wie Ersatzmembranen zusammen. Um den Betriebsaufwand der Onlinemessungen darzustellen, werden im Folgenden zwei Beispiele herangezogen und gegenüber gestellt:

1. Messung NH<sub>4</sub>-N am RÜB Talstraße: Der Messort stellt sich im Projektverlauf als sehr günstiger Messort heraus und gilt als Positivbeispiel. Er kennzeichnet sich durch geringe Verschmutzungen der Sonden mit Fetten und lange Lebensdauer der Membranen durch niedrigen Feststoffgehalt im Abwasser.
2. Messung CSB „Zulauf Nümbrecht“ im Zulaufkanal der Kläranlage Homburg-Bröl: Ein Negativbeispiel mit dem höchsten Aufwand im Projektverlauf durch massive Verschmutzung.

Die Arbeitsleistung in Minuten wird anhand der Wartungsunterlagen abgeschätzt. Obwohl bei der CSB-Messung aufgrund des Messprinzips (UV/VIS, optisch) keine Messelektroden verwendet werden - und demnach auch keine ausgetauscht werden müssen - ist der monatliche Zeitaufwand durch die tägliche Reinigung vergleichsweise hoch. Die Messung „Talstraße“ verursacht aufgrund von günstigeren Umständen deutlich weniger Personaleinsatz. Bei den anderen Online-Messungen der übrigen KANNST-RÜB ist die gesamte monatlich Aufwendung im Bereich zwischen den Zeiten der beiden Beispiele anzusiedeln. Die Kosten für Membranen müssen mit 1.500 € je NH<sub>4</sub>-N Sonde berücksichtigt werden, bei den CSB-Messungen entfällt dieser Kostenfaktor. Weitere Auswertungen zum Betriebsaufwand der Onlinemessungen an den einzelnen Messstandorten befinden sich im Anhang.

**Tabelle 40: Betriebsaufwand Onlinemessungen**

Arbeitsgang	NH <sub>4</sub> -N am RÜB Talstraße, Einbau im Messgerinne	CSB „Zulauf Nümbrecht“ Einbau im Kanal
Kalibrierung	2 x monatlich, ca. 45 Min.	3 x monatlich, ca. 45 Min.
Zwei-Punkt- Standardkalibrierung	Alle 2 Monate, ca. 45 Min.	Entfällt
Reinigung	2 x wöchentlich, ca. 15 Min.	Täglich, ca. 15 Min.
Messelektroden ersetzen	Alle 3 Monate, ca. 80 Min.	Entfällt
Materialaufwand Membranen	Ca. 1.500 € / Jahr	Entfällt
Summe / Jahr + Kosten	Ca. 54 Stunden + 1.500 €	Ca. 90 Stunden

## 20 Zusammenfassung

In den ersten zwei Jahren des Projekts stand die Erfassung des Ist-Zustands des gesamten Kanalnetzes im Einzugsgebiet der Kläranlage Homburg-Bröl und des Gewässers „Brölbach“ im Mittelpunkt. Dazu wurden für eine umfassende Bestandsaufnahme von hydraulischen und frachtabhängigen Messgrößen vor allem im Kanalnetz Messeinrichtungen installiert. Alle für das Projekt notwendigen Messgrößen wurden an den einzelnen RÜB für einen Zeitraum von einem Jahr aufgenommen. Darüber hinaus wurden Messungen im Gewässer jeweils vor und hinter den Einleitungsstellen der RÜB durchgeführt.

Für die Bestandsaufnahme wurden spezielle Messcontainer entwickelt. Diese Container sind ausgestattet mit eigens dafür konstruierten Gerinnen, durch die im Bypass das Medium (aus dem Kanal bzw. der Entlastung) gepumpt wird. In den Messgerinnen waren ionenselektive und optische Sensoren zur Erfassung von z.B.  $\text{NH}_4\text{-N}$  oder CSB installiert. Zusätzlich wurden Probenehmer mit Kühlvorrichtung für 24 Mischproben vorgesehen. Die Container verfügten über eine Anbindung zu dem zentralen Leittechniksystem. In diesem Zusammenhang wurden unterschiedliche Verbindungsarten getestet.

Parallel zur Datenaufnahme ist ein Modell der Kläranlage und des Kanalnetzes in einer Simulationsumgebung entwickelt worden. Mit Hilfe der Messdaten konnten die Modelle erfolgreich kalibriert und validiert werden. Damit sind neue, erhöhte Drosselwassermengen für die im Netz vorhandenen RÜB bestimmt worden. Mit dem Modell konnte der hydraulische Nachweis geführt werden um die hydraulischen Kapazitäten voll auszuschöpfen.

Mit Hilfe der Simulation sind drei Stufen für die Regelung des Abwasserabflusssystemes mit folgenden Zielen entwickelt und erprobt worden:

- **Stufe 1 – optimierte hydraulische Regelung**
  - Optimale Nutzung der vorhandenen hydraulischen Kapazitäten.
- **Stufe 2 – Konzentrations-/Frachtregler (Sommer/Winter)**
  - Sommerbetrieb - Becken an empfindlichen Stellen des Bachlaufs werden mit höherer Priorität behandelt. Entlastungen konnten dadurch vermieden bzw. reduziert werden.
  - Winterbetrieb - bei RÜB, die historisch häufiger eine höhere  $\text{NH}_4\text{-N}$  Fracht in der Entlastung aufgewiesen haben, werden Entlastungen verstärkt vermieden bzw. verringert.
- **Stufe 3 – Regelung nach Online-Messungen**
  - Die  $\text{NH}_4\text{-N}$  Konzentration wird online gemessen und es wird abhängig von der errechneten Fracht bzw. Konzentration im RÜB geregelt.

Alle drei Stufen verfügen über einen übergeordneten Zustandsgenerator sowie Fuzzy-Technologie und sind unter Einsatz von Computational Intelligence Tools umgesetzt worden. Zustandsgeneratoren berücksichtigen Belastungsinformationen aus dem gesamten Niederschlagsabflusssystem. Die Kapazität, die hydraulische Belastung der Kläranlage, die Temperatur des Abwassers sowie Niederschlagswerte fließen in die Algorithmen mit ein.

Stufe 1 wurde auf eine optimale hydraulische Nutzung der vorhandenen Volumina ausgelegt. Dabei werden vor allem Durchflussmengen im Kanalnetz, Beckenfüllstände und Zuflussmengen zur Kläranlage berücksichtigt.

In der Stufe 2 der Regelung sind zusätzlich jahreszeitlich abhängige, gewässerorientierte Betrachtungen integriert worden, um im Sommer wie auch im Winter gezielt Emissionen an empfindlichen Einleitungsstellen zu reduzieren.

Im Sommerbetrieb wird das Gewässer weniger mit gefährlichen Konzentrationsspitzen aus den Entlastungen der Regenüberlaufbecken belastet. Gerade in wärmeren und trockeneren Wetterphasen können kurzfristige Konzentrationsspitzen dem Bachlauf und der darin befindlichen Fauna Schaden zufügen.

Für den Winterbetrieb wurde eine Schmutzstoff-Fracht-Regelung realisiert, um das Lachslaichgewässer vor größeren Schmutzstoffmengen aus dem Kanal zu schützen. Stufe 2 arbeitet zur Berücksichtigung der Schmutzstoffkonzentrationen mit im System hinterlegten Ganglinien aus der Bestandsaufnahme.

Für Stufe 3 kommen zusätzlich Online-Messgrößen für Frachtstoffe im Kanalnetz zum Einsatz. Der Schwerpunkt dieser Regelung liegt auf der Minimierung der Einträge aus dem Kanalnetz in das Gewässer.

Das Regelungskonzept in allen drei Stufen konnte erfolgreich in der Praxis über einen längeren Zeitraum erprobt werden:

- Stufe 1 – Juni 2008 bis März 2010
- Stufe 2 – April 2010 bis März 2011
- Stufe 3 – März 2011 bis Dezember 2011

Bei allen drei Stufen ist eine Strangregelung integriert, die den maximal möglichen Zufluss zur Kläranlage zum Ziel hat. Darüber hinaus sind künstliche neuronale Netze sowie unterschiedliche Niederschlagserfassungssysteme für die Entwicklung eines vorausschauenden Regelungskonzeptes untersucht und berücksichtigt worden.

Für den sicheren Betrieb wurde ein neues Sicherheitskonzept entwickelt. Es beinhaltet Rückfallstrategien für die Regelungsstufen, die auf unterschiedliche Störfälle angemessen reagieren.

Die Auswertung der Stufe 2 in der Simulation hat eine Reduzierung der Entlastungsmengen im gesamten Kanalnetz von bis zu 34 % pro Jahr ergeben. Besonders hervorzuheben ist dabei, dass hydraulische Kapazitäten von einzelnen RÜB unter Einsatz der Regelung in vollem Umfang genutzt werden konnten, wo hingegen bestimmte RÜB ohne Optimierung selbst nach starken Niederschlagsereignissen nur maximal teilgefüllt waren.

Außerdem können unter Einsatz des Reglers in Stufe 1 im Zeitraum von Juni 2008 bis März 2010, 5 Entlastungsereignisse vollständig verhindert werden. Die Entlastungsrate beträgt dabei im Durchschnitt 5 % für das gesamte Kanalnetz, der Netzplan sieht durchschnittlich 26 % vor.

Bei Betrachtung des gesamten Kanalnetzes konnte die Belastung des Gewässers aus den RÜB hydraulisch und stofflich in allen drei Regelungsstufen reduziert werden. Es werden Einträge aus den Entlas-

tungen direkt in das Gewässer von bis zu 460 kg  $\text{NH}_4\text{-N}$  (25%) und 9.566 kg CSB (26%) reduziert. Der Eintrag aus dem Gesamtsystem Kanalnetz und Kläranlage in die Bröl reduziert sich um 133 kg  $\text{NH}_4\text{-N}$  (7,77%) und 1.360 kg CSB (1,23%).

Stufe 3 kann gezielt bei Spülstößen nach einem Regenereignis die Konzentrationsspitzen besser als Stufe 2 vermindern. Allerdings ist ein hoher Aufwand nötig, um die Messtechnik, welche die Daten für die  $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentrationen liefert, bereitzustellen und zu warten.

Zusätzlich kann es sinnvoll sein, automatische Reinigungsvorrichtungen einzusetzen, um den Wartungsaufwand zu reduzieren und um eine hohe Qualität der Messdaten zu gewährleisten. Prototypen für automatische Reinigungseinrichtungen wurden im Rahmen des Projektes entwickelt. Dazu gehörten eine automatische Rückspülung der Gerinne, direkte Messungen in Rohrleitungen mit Luftspülungen und Messungen im Kanal mit Schwenk- und Hubvorrichtungen.

Durch die Regelung wird in allen drei Stufen mehr Abwasser auf der Kläranlage behandelt. Dies ermöglicht die Fokussierung auf die Haupteinleitungsstelle und damit den Ersatz zusätzlicher Bauwerke durch einen großen Bodenfilter hinter dem RÜB der Kläranlage. Die Regelung führt dabei zu einer ordnungsgemäßen hydraulischen Auslastung des neuen Bodenfilters. Die erreichten Reduzierungen der stofflichen Einträge schaffen Flexibilität bei Ausbau und Erweiterung von Kanalnetz und Sonderbauwerken.

Unter Abwägung von Kosten und Nutzen wird ein dauerhafter Betrieb der Stufe 2 für das Einzugsgebiet Homburg-Bröl angestrebt.

## 21 Anhang

### 21.1 Gegenüberstellung der Projektziele und durchgeführten Arbeiten bzw. Ergebnisse

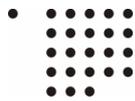
Ziel	durchgeführte Arbeiten	Ergebnisse
<p><b>Ziel 1: Verbesserung der Nutzung der vorhandenen RÜB</b> durch Einsatz einer Steuerung. Damit kann das Stauvolumen optimal ausgenutzt werden und ein zusätzlicher Ausbau des vorgesehenen Stauvolumens ist verzichtbar.</p>	<p>Entwicklung einer Simulation von Kanalnetz und Kläranlage. Erproben von Regelungsstrategien mittels Simulation mit anschließender Verfeinerung und Optimierung.</p> <p>Umsetzung in die Praxis, Inbetriebnahme von Regler-Projekten, Auswertungen anhand von Messergebnissen.</p>	<p>Entlastungsmengen können im gesamten Kanalnetz um bis zu 34 % pro Jahr reduziert werden.</p> <p>Die Kapazität z.B. von RÜB Kalkofen wird mit Steuerung in vollem Umfang genutzt (ohne Steuerung selbst nach starken Regenereignissen nur maximal teilgefüllt).</p>
<p><b>Ziel 2: Harmonisierung der Ansteuerung der RÜB</b>, so dass Entlastungen von RÜB direkt nach einem Regenereignis (ein RÜB entleert sich und die nachgeschalteten RÜBs laufen über) vermieden werden.</p>	<p>Simulation, Auswertung von PDV-Daten, Änderungen an RÜB-Steuerungsprogrammen (z.B. Anpassen von Spülprogrammen und Pumpensteuerungen).</p>	<p>Unter Einsatz des Reglers in Stufe 1 können im Zeitraum von Juni 2008 bis März 2010, bis zu 5 Entlastungsereignisse nachweislich verhindert werden. Die Entlastungsrate beträgt dabei im Durchschnitt 5 % für das gesamte Kanalnetz, erlaubt nach Netzplan ist ein Wert durchschnittlich von 26 %.</p>
<p><b>Ziel 3: Vergleichmäßigung der Zulaufmengen zur Kläranlage.</b> Im Gegensatz zum üblichen Ansatz, die Zulaufmenge zu egalisieren, soll bei der geplanten Steuerstrategie die Ammonium-Belastung und/oder die CSB-Belastung vergleichmäßigt werden. Dies soll nach neuen Forschungsergebnissen die Belastung des Gewässers wirkungsvoller als bisher reduzieren.</p>	<p>Installation von benötigten Durchflussmessungen (MID). Betrieb von geeigneten Systemen zur Messung von CSB bzw. Ammonium-Stickstoffgehalt: Spektroskopische UV/VIS-Messverfahren respektive ionenselektiven Sensoren.</p> <p>Entwicklung und Um-</p>	<p>Die Belastung des Gewässers konnte hydraulisch und stofflich in allen drei Regelungsstufen reduziert werden (bei Betrachtung des gesamten Niederschlagsabflusssystemes).</p> <p>Der Eintrag ins Gewässer aus dem Kanalnetz wird um bis zu 460 kg NH<sub>4</sub>-N (25%) und 9.566 kg CSB (26%) pro Jahr reduziert.</p> <p>Sommerbetrieb mindert gefährliche Konzentrationsspitzen, Winterbetrieb</p>



	<p>setzung der Regler-Stufen 2 und 3 mit Komponenten zur Frachtoptimierung (online /offline) im Verbundsystem.</p> <p>Integration von Sommer- und Winterbetrieb zur Anpassung an jahreszeitbedingte Gewässerverhältnisse.</p>	<p>reduziert absolute Schmutzstoffmengen-Einträge.</p>
<p><b>Ziel 4: Optimierung der Zulauf-fracht und der Regelung der Kläranlage</b> auf der Basis der zulässigen Ablaufkonzentrationen (BSB und/oder N-Gesamt bzw. NH<sub>4</sub>-N) der Kläranlage. Als nächster Schritt ist nahe liegend, die Kapazität der Kläranlage über die integrierte Regelung von Kanalnetz und Kläranlage optimal zu nutzen. Damit kann der Ablauf entsprechend der vorgegebenen Bemessung eingestellt werden.</p>	<p>Implementierung eines Zustandsgenerators zur Bestimmung von Belastungsinformationen aus dem gesamten Niederschlagsabflusssystem. Dabei werden u.a. die hydraulische Belastung der Kläranlage und die Abwassertemperatur in den Algorithmen mitberücksichtigt.</p> <p>Umsetzung einer Regelung zur Fällmittel-Dosierung zwecks Phosphorelimination mit dazugehöriger Erhöhung der Phosphat-Messung.</p>	<p>Mit Regler und implementiertem Zustandsgenerator wird die Kläranlagenkapazität besser genutzt.</p> <p>Auswertungen haben ergeben, dass mit variabler Fahrweise der Stickstoffablaufkonzentration keine Verbesserung für das Gewässer erreicht werden kann, da im Vorfeld des Projekts die Kläranlage bereits umfangreich mit Fuzzyreglern für eine optimierte Belüftungssteuerung ausgerüstet worden ist.</p> <p>Aufgrund der Ergebnisse wurde stattdessen eine neue Phosphat-Regelung umgesetzt.</p> <p>Dadurch wird eine Fällmittel-Reduzierung von bis zu 30% erwartet.</p>
<p><b>Ziel 5: Integration von selbstlernenden Vorhersagekomponenten in die Regelung.</b> In dem Projekt wird untersucht, in wie weit nutzbringende Prognosen mit Hilfe von selbstlernenden neuronalen Netzen möglich sind.</p>	<p>Selbstlernende künstliche neuronale Netze (KNN) werden zur Prognose der Belastung des Kläranlagenzulaufs (Konzentrationen NH<sub>4</sub>-N und CSB) erstellt. Ein analytisches Modell wird hierbei für die Ermittlung der optimalen Konfiguration des</p>	<p>Es sind gute Ergebnisse bei der Vorhersage der hydraulischen KA-Zulaufmenge erzielt worden. Allerdings sind Vorhersagen für die NH<sub>4</sub> und CSB Konzentrationen nicht ausreichend belastbar für eine Integration in eine Gesamtregelungsstrategie.</p> <p>Das KNN produziert keine Verläufe mit der Dynamik typischer Tagesgänge. Da die prognostizierten Werte</p>



	<p>Prognose- und Regelungssystems verwendet, jedoch nicht für die Prognose selbst.</p> <p>In Auswertungen werden Ausgaben der KNN mit Messwerten verglichen um die Prognosequalität zu beurteilen.</p>	<p>von ihrem Betrag her dem allgemeinen Trend der Messwerte folgen, ist es möglich, eine grobe Fehlfunktion eines Messgeräts (z.B. Verschmutzung der Sonde) zu erkennen. Der Einsatz einer Prognose für NH4-N oder CSB ist mit wartungsintensiven Online-Messungen verbunden, die über große Zeiträume und mit hoher Qualität aufgenommen werden müssen.</p> <p>Der Einsatz der erforderlichen Onlinesensortechnik war ausschließlich an den Kriterien des KANNST-Projektes ausgerichtet. Für zukünftige Projekte müssen in diesem Bereich praxisnahe Einbaumöglichkeiten für die eingesetzten Messgeräte entwickelt werden. Diese müssen auf Dauer einen sicheren und kostengünstigen Betrieb ermöglichen. Für Entwicklungen in dieser Richtung wurden im Rahmen des KANNST-Projektes erste Voraussetzungen geschaffen.</p>
<p><b>Ziel 6: Radarmessung zur Erfassung des Niederschlages im Einzugsbereich des Kanalnetzes.</b> Je mehr Messgrößen verfügbar sind, umso zuverlässiger kann das neuronale Netz Zustandsgrößen des Systems berechnen bzw. vorher-sagen. Die Antragsteller erwarten von der Integration dieser Messgrößen eine deutliche Verbesserung der Prognosewerte, da Online-Regendaten einer Prognose der Kanalbelastung und damit des Zulaufs der Kläranlage entsprechen.</p>	<p>Ein Messfeld zur Niederschlagsfassung, bestehend aus verschiedenen Instrumenten, ist am RÜB Talstraße aufgebaut (Regenradar, Laser-Distrometer und konventionell mit Auffangbehälter).</p> <p>Niederschlagsschreiber werden an die Kanalnetzsteuerung und das Datenverarbeitungssystem angebunden.</p> <p>Messergebnisse werden verglichen und im Hinblick auf eine vorausschauende Regelung</p>	<p>Niederschlagswerte werden vom Zustandsgenerator des Reglers berücksichtigt und fließen in eine vorausschauende Regler-Strategie ein. Regendaten werden zur Kategorisierung von Regenereignissen benutzt (Abgleich mit Kostra-Tabelle).</p> <p>Das Kanalsystem verfügt über Totzeiten: Der Niederschlag zeigt erst nach 20-80 Minuten Auswirkungen in der Kanalisation. Dieses Zeitfenster ist ausreichend für eine vorausschauende Anpassung der Stellgrößen im System, sodass der Einsatz von Prognosesystemen keine weitere Optimierung erreicht. Die Erfassung des Niederschlags mit einem Flächenradar erlaubt keine weitere Optimierung des Abflussverhaltens, aufgrund</p>



	ausgewertet.	<p>der topografischen Verhältnisse in der Region.</p> <p>Ein Schichtradar zur Erfassung der Niederschlagsformen (z.B. Schnee). kann im Oberbergischen Land sinnvoll eingesetzt werden.</p>
<p><b>Weiteres Ziel, nicht im Förderbescheid enthalten:</b></p> <p>Nutzen einer Kanalnetzsteuerung abwägen im Hinblick auf den angedachten Netzausbau mit neuen Bodenfiltern</p>	Simulation, praktische Erfahrung sammeln mit unterschiedlichen Regelungsstrategien.	<p>Durch die Regelung wird mehr Abwasser auf der Kläranlage behandelt und dies ermöglicht die Fokussierung auf eine Haupteinleitungsstelle.</p> <p>Mit Regelung könnte auf einzelne Bauwerke zugunsten eines großen Bodenfilters hinter dem RÜB KA verzichtet werden. Die Regelung führt dabei zu einer ordnungsgemäßen hydraulischen Auslastung des neuen Bodenfilters.</p> <p>Die hier erreichte Reduzierung der stofflichen Einträge, schafft Flexibilität bei Ausbau und Erweiterung von Kanalnetz und Sonderbauwerken.</p> <p>Beispiel: An einigen RÜB sind Bodenfilter angedacht, die aufgrund von Platzmangel nur schwer zu realisieren sind.</p>

## 21.2 Auswertungen für den zeitlichen Arbeitsaufwand der Online-Messungen im Kanal

Tabelle 41: Betriebsaufwand für einzelne Messungen

K = Kanal  
GE = Gerinne, Entl.  
GA = Gerinne, Abl.  
BE = Bypass, Entl.  
BA = Bypass, Abl.

Messung	Einbauort	Zugänglichkeit	Tätigkeit	Zeit (min)	n/a
pH Romm	GE	gut	reinigen	15	0

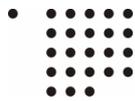


NH4 Hast	GA	gut	reinigen	15	104
pH Hast	GE	gut	reinigen	15	0
NH4 Tal	GE	gut	reinigen	15	0
NH4 Tal	GA	gut	reinigen	15	104
CSB Tal	GA	gut	reinigen	20	104
pH Tal	GE	gut	reinigen	15	0
NH4 Kalk	GE	gut	reinigen	15	0
NH4 Kalk	K	schlecht	reinigen	20	730
pH Kalk	GE	gut	reinigen	15	0
NH4 Ecken	BA	gut	reinigen	15	104
pH Ecken	GE	gut	reinigen	15	0
NH4 Sänger	GA	gut	reinigen	15	104
pH Sänger	GE	gut	reinigen	15	0
NH4 RÜB KA	BE	gut	reinigen	15	0
pH RÜB KA	BE	gut	reinigen	15	0
NH4 Zul Num	K	schlecht	reinigen	15	730
CSB Zul Num	K	schlecht	reinigen	30	730
NH4 Zul Ges	K	mittel	reinigen	15	104
CSB Zul Ges	K	mittel	reinigen	20	104

Messung	Verschmutzung	Anfahrt (min)	Tätigkeit	Zeit (min)	n/a
pH Romm	gering	40	kalibrieren	30	12
NH4 Hast	hoch	40	kalibrieren	45	36
pH Hast	gering	40	kalibrieren	30	12
NH4 Tal	gering	40	kalibrieren	45	12
NH4 Tal	hoch	40	kalibrieren	45	36
CSB Tal	hoch	40	kalibrieren	180	1
pH Tal	gering	40	kalibrieren	30	12
NH4 Kalk	gering	40	kalibrieren	45	12
NH4 Kalk	sehr hoch	40	kalibrieren	45	36
pH Kalk	gering	40	kalibrieren	30	12
NH4 Ecken	hoch	40	kalibrieren	45	36
pH Ecken	gering	40	kalibrieren	30	12
NH4 Sänger	hoch	40	kalibrieren	45	36
pH Sänger	gering	40	kalibrieren	30	12
NH4 RÜB KA	gering	40	kalibrieren	45	12
pH RÜB KA	gering	40	kalibrieren	30	12
NH4 Zul Num	sehr hoch	40	kalibrieren	45	36
CSB Zul Num	sehr hoch	40	kalibrieren	180	1
NH4 Zul Ges	mittel	40	kalibrieren	45	36
CSB Zul Ges	mittel	40	kalibrieren	180	1

Tabelle 42: Jährlicher Zeitaufwand

Messung	Reinigung h/a	Kalibrieren h/a	gesamt h/a
pH Romm	0,00	14,00	14,00
NH4 Hast	95,33	51,00	146,33
pH Hast	0,00	14,00	14,00
NH4 Tal	0,00	17,00	17,00



NH4 Tal	95,33	51,00	146,33
CSB Tal	104,00	3,67	107,67
pH Tal	0,00	14,00	14,00
NH4 Kalk	0,00	17,00	17,00
NH4 Kalk	730,00	51,00	781,00
pH Kalk	0,00	14,00	14,00
NH4 Ecken	95,33	51,00	146,33
pH Ecken	0,00	14,00	14,00
NH4 Sänger	95,33	51,00	146,33
pH Sänger	0,00	14,00	14,00
NH4 RÜB KA	0,00	17,00	17,00
pH RÜB KA	0,00	14,00	14,00
NH4 Zul Num	669,17	51,00	720,17
CSB Zul Num	851,67	3,67	855,33
NH4 Zul Ges	95,33	51,00	146,33
CSB Zul Ges	104,00	3,67	107,67